AILTON DIAS DOS SANTOS

**ESTUDO DAS POSSIBILIDADES
DE RECICLAGEM DOS RESÍDUOS
DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA
REGIÃO METROPOLITANA DE
SÃO PAULO**

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

São Paulo
2003

AILTON DIAS DOS SANTOS

**ESTUDO DAS POSSIBILIDADES
DE RECICLAGEM DOS RESÍDUOS
DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA
REGIÃO METROPOLITANA DE
SÃO PAULO**

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

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil

Orientador:
Prof. Livre-Docente
Vanderley Moacyr John

São Paulo
2003

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Ailton Dias dos

Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo / Ailton Dias dos Santos. -- São Paulo, 2003.

265 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Lodo 2.Esgotos sanitários {São Paulo (SP)} 3.Reciclagem de resíduos urbanos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

“E, como a grande quantidade de leis fornece com freqüência justificativas aos vícios, de forma que um Estado é mais bem dirigido quando, apesar de possuir muito poucas delas, são estritamente cumpridas; portanto, em lugar deste grande número de preceitos de que se compõe a Lógica, achei que me seriam suficientes os quatro seguintes, uma vez que tomasse a firme e inalterável resolução de não deixar uma só vez de observá-los.

O primeiro era o de nunca aceitar algo como verdadeiro que eu não conhecesse claramente como tal; ou seja, de evitar cuidadosamente a pressa e a presunção, e de nada fazer constar de meus juízos que não se apresentasse tão clara e distintamente a meu espírito que eu não tivesse motivo algum de duvidar dele.

O segundo, o de repartir cada uma das dificuldades que eu analisasse em tantas parcelas quantas fossem possíveis e necessárias a fim de melhor solucioná-las.

O terceiro, o de conduzir por ordem meus pensamentos, iniciando pelos objetos mais simples e mais fáceis de conhecer, para elevar-me, pouco a pouco, como galgando degraus, até o conhecimento dos mais compostos, e presumindo até mesmo uma ordem entre os que não se precedem naturalmente uns aos outros.

E o último, o de efetuar em toda parte relações metódicas tão completas e revisões tão gerais nas quais eu tivesse a certeza de nada omitir.”

“... para não hesitar em minhas ações, enquanto a razão me obrigasse a fazê-lo, em meus juízos, e a fim de continuar a viver desde então de maneira mais feliz possível, concebi para mim mesmo uma moral provisória, que consistia apenas em três ou quatro máximas que eu quero vos anunciar.”

“... começando desde então a não me valer para nada de minhas próprias opiniões, porque eu as queria submeter todas a análise, estava convencido de que o melhor a fazer era seguir as dos mais sensatos.”

“Minha segunda máxima consistia em ser o mais firme e decidido possível em minhas ações, e em não seguir menos constantemente do que se fossem muito seguras as opiniões mais duvidosas, sempre que eu me tivesse decidido a tanto.”

“Minha terceira máxima era a de procurar sempre antes vencer a mim próprio do que ao destino, e de antes modificar os meus desejos do que a ordem do mundo; e, em geral, a de habituar-me a acreditar que nada existe que esteja completamente em nosso poder, salvo os nossos pensamentos, de maneira que, após termos feito o melhor possível no que se refere às coisas que nos são exteriores, tudo em que deixamos de nos sair bem é, em relação a nós, absolutamente impossível.”

René Descartes

In “Discours de la Méthode pour bien Conduire Sa Raison et Chercher la Vérité à travers les Sciences”, 1637.

À minha Mãe, para quem meus maiores esforços, para mim, ainda são pequenos diante da infinita gratidão que lhe tenho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Vanderley Moacyr John, por muito mais que uma orientação motivadora e segura, pois foi o responsável pela minha permanência no programa de pós-graduação, apesar de todos os percalços pessoais ocorridos neste período, numa demonstração de confiança que espero um dia oferecer aos meus alunos, assim como a recebi.

Aos Professores Dr. Antonio Carlos Vieira Coelho e Dra. Dione Mari Morita, que foram muito além das contribuições de componentes da banca examinadora, para uma efetiva discussão do tema tratado, além de disponibilizarem laboratórios e material para esta pesquisa.

À Professora Maria Alba Cincotto, pela dedicação e forma ímpares em despertar o interesse pela vida acadêmica e proporcionar meu reencontro com a Química.

Ao amigo Marcelo Kenji Miki, pela confiança e colaboração em momentos críticos desta pesquisa, contribuindo de forma pessoal e profissional. Aos amigos da Sabesp, Airtton Checonni David e Fátima Valéria de Carvalho, que por incontáveis vezes contribuíram para a conciliação entre as minhas atividades do escritório e esta pesquisa, além das muitas e muitas horas de discussão sobre o tema pesquisado. À Adéria pelas infundáveis buscas arqueológicas na Biblioteca da Sabesp. Aos meus amigos do escritório Denise, Edna, Eunice, Teresa e Alexandre que tantas vezes interromperam suas atividades para me auxiliarem. Aos químicos da Sabesp, Francisco, Vera e Jefferson, pela cortesia e gentileza no fornecimento de dados das ETes. À amiga Valquíria, química na EPUSP e entusiasta neste tema.

Aos alunos e amigos da Escola Técnica Estadual “Guaracy Silveira” pela compreensão e colaboração incondicionais. À minha família pela paciência e compreensão com minha ausência, e a amigos como Seu Zé, Dona Lizete e Dona Deja, por tantos cuidados e atenção.

À Lídia Couto que esteve ao meu lado desde o início deste trabalho, colaborando de forma técnica e como amiga pessoal, nos mais diferentes momentos. E de uma forma particular e especial, quero agradecer aos parceiros deste trabalho Sérgio Zordan e Ada Castro que têm uma parcela grande e específica nesta pesquisa.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp, especificamente ao Departamento de Desenvolvimento e Pesquisa, por terem propiciado a minha participação neste programa de mestrado.

Enfim, quero agradecer a cada pessoa que direta ou indiretamente colaborou para que este trabalho fosse realizado. Sem dúvidas esta tarefa não teria sido realizada sem o auxílio da cada uma delas, quer por minha inexperiência, quer por um envolvimento pessoal com a questão, um paradoxo: este envolvimento foi simultaneamente o desgaste e a motivação para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
RESUMO	
ABSTRACT	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	6
1.1.1 OBJETIVO GERAL	6
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7

CAPÍTULO 2

ESGOTOS SANITÁRIOS	9
2.1 QUALIDADE DAS ÁGUAS E POLUIÇÃO	9
2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ESGOTOS	13
2.2.1 SÓLIDOS	14
2.2.2 MATÉRIA ORGÂNICA CARBONÁCEA	14
2.2.3 NITROGÊNIO	15
2.2.4 FÓSFORO	15
2.2.5 INDICADORES DE CONTAMINAÇÃO FECAL	15
2.2.6 OUTROS CONTAMINANTES	16
2.3 ESGOTAMENTO SANITÁRIO	16
2.4 TRATAMENTO DE ESGOTOS	18
2.4.1 SISTEMA DE LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL	20
2.5 LODO DE ESGOTOS	22
2.5.1 CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO	23
2.5.2 PRINCIPAIS CONTAMINANTES DO LODO	25
2.5.2.1 METAIS PESADOS	26
2.5.2.2 MICRORGANISMOS PATOGENICOS	28
2.5.2.3 POLUENTES ORGÂNICOS	31
2.5.3 ÍNDICES FUNDAMENTAIS	33
2.5.3.1 RELAÇÃO ENTRE TEOR DE SÓLIDOS E UMIDADE	33
2.5.3.2 SÓLIDOS TOTAIS, VOLÁTEIS E FIXOS	34
2.5.3.3 REMOÇÃO DE SÓLIDOS VOLÁTEIS	35
2.5.3.4 DENSIDADE DO LODO	35
2.5.3.5 EXPRESSÃO DO TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS	35
2.5.3.6 CARGA DE SÓLIDOS	35
2.5.3.7 CAPTURA DE SÓLIDOS	35
2.5.4 TRATAMENTO DO LODO	36

2.5.5 ESTABILIZAÇÃO DE LODOS	38
2.5.6 REMOÇÃO DE ÁGUA	40
2.5.6.1 ADENSADORES POR GRAVIDADE	41
2.5.6.2 FLOTADORES POR AR DISSOLVIDO	41
2.5.6.3 CONDICIONAMENTO	41
2.5.6.4 DESIDRATAÇÃO	44
2.5.6.5 SECAGEM TÉRMICA	45
2.5.7 HIGIENIZAÇÃO DE LODOS	47

CAPÍTULO 3

DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS DE ESGOTOS	49
3.1 PRINCIPAIS TIPOS DE TRANSFORMAÇÃO PARA DESCARTE DO LODO	49
3.1.1 OXIDAÇÃO ÚMIDA	50
3.1.2 INCINERAÇÃO	51
3.1.3 ATERRO SANITÁRIO	54
3.1.4 <i>LANDFARMING</i>	55
3.2 USOS BENÉFICOS DOS LODOS DE ESGOTOS.....	56
3.2.1 USOS BENÉFICOS NO SOLO.....	56
3.2.2 FABRICAÇÃO DE AGREGADOS LEVES.....	58
3.2.2.1 EXPERIÊNCIA NACIONAL	62
3.2.3 FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	79
3.2.4 PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA.....	83
3.3 PROBLEMAS NA RECICLAGEM DO LODO DE ESGOTO	88
3.3.1 SAÚDE OCUPACIONAL NO MANUSEIO DO LODO.....	88
3.3.2 TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE LODO.....	90
3.3.3 PROCESSAMENTO TÉRMICO DE LODOS E POLUIÇÃO.....	94
3.3.3.1 METAIS PESADOS E CINZAS.....	96
3.3.3.2 MERCÚRIO	97
3.3.3.3 DIOXINAS E FURANOS.....	99
3.3.3.4 OUTROS POLUENTES.....	101
3.3.3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE USO INDUSTRIAL DO LODO E POLUIÇÃO.....	102

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE PESQUISA PARA RECICLAGEM	104
4.1 ESTRUTURA DA METODOLOGIA	104
4.1.1 Seleção do resíduo a ser estudado	105
4.1.2 Processo de geração, tratamento e gestão dos resíduos	105
4.1.3 Caracterização do resíduo	106
4.1.4 Seleção das aplicações a serem desenvolvidas	106
4.1.5 Desenvolvimento do produto	109
4.1.6 Avaliação do produto	110
4.1.7 Análise de desempenho ambiental	110
4.1.8 Viabilidade econômica	111
4.1.9 Transferência de tecnologia	112
4.2 PLANO DO TRABALHO	112

CAPÍTULO 5

GESTÃO DOS RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO – ETE	116
5.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA RMSP.....	116
5.1.1 Operações e processos das ETES da RMSP.....	122
5.1.2 Quantidades atuais e perspectivas de tratamento de esgotos.....	127
5.2 TAXAS DE GERAÇÃO E PRÁTICAS DE GESTÃO DOS RESÍDUOS	128
5.2.1 Panorama Internacional	128
5.2.2 Alternativas do Plano Diretor.....	129
5.2.3 Situação atual na RMSP.....	131
5.3 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES.....	138

CAPÍTULO 6

CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	143
6.1 TORTA DE LODO DE ESGOTO E PELLETS	143
6.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	144
6.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	145
6.4 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS	150
6.5 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS	153
6.6 LIXIVIAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS METAIS NO LODO.....	161
6.7.ALGUMAS CONSIDERAÇÕES	163

CAPÍTULO 7

SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA OS LODOS DE ETES.....	165
7.1 GERAÇÃO DO “DOSSIÊ DO RESÍDUO”	165
7.2 ENTREVISTAS COM ESPECIALISTAS	167
7.2.1 Interesse pela torta de lodo de esgotos	168
7.2.2 Razões do interesse pela torta de lodo de esgotos	169
7.2.3 Especificação dos sistemas de reciclagem	170
7.3 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE RECICLAGEM	170
7.3.1 Avaliação ambiental dos sistemas de reciclagem	171
7.3.1.1 Critérios de avaliação	171
7.3.1.2 Resultados da avaliação para tortas de lodo de esgotos	173
7.3.2 Avaliação de saúde ocupacional dos sistemas de reciclagem	176
7.3.2.1 Critérios de avaliação	177
7.3.2.2 Resultados da avaliação para tortas de lodo de esgotos	178
7.3.3 Avaliação de mercado	179
7.3.3.1 Critérios de avaliação	179
7.3.3.2 Resultados da avaliação para tortas de lodo de esgotos	180
7.3.4 Avaliação econômica	182
7.3.4.1 Critérios de avaliação	182
7.3.4.2 Resultados da avaliação para tortas de lodo de esgotos	183
7.4 SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS POTENCIALMENTE SUSTENTÁVEIS	185
7.5 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES	187

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS	189
8.1 CONCLUSÕES	192
8.2 PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS	193

ANEXOS

A - DADOS OPERACIONAIS DAS ETES	195
B - DOSSIÊ DO RESÍDUO	205
C - FORMULÁRIOS DAS ENTREVISTAS	215

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	256
----------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Ciclo do uso da água.	10
Figura 2.2	Impurezas contidas na água.....	10
Figura 2.3	Classificação e distribuição dos sólidos em função do tamanho	11
Figura 2.4	Sólidos nos esgotos.	13
Figura 2.5	Distribuição aproximada dos sólidos do esgoto bruto, concentração	14
Figura 2.6	Exemplo do conceito da DBO.....	14
Figura 2.7	Sistemas de esgotamento separador e combinado.....	17
Figura 2.8	Partes constitutivas do sistema convencional.....	18
Figura 2.9	Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional.	20
Figura 2.10	Fluxogramas usuais de tratamento e disposição do lodo	37
Figura 2.11	Principais tipos de mistura utilizados em digestores anaeróbios.....	39
Figura 2.12	Corte esquemático de um adensador por gravidade	41
Figura 2.13	Fluxograma instalação de um filtro prensa para desidratação de lodos .	44
Figura 2.14	Esquema de funcionamento do processo de secagem térmica	46
Figura 3.1	Sistema de oxidação úmida convencional com reator vertical.....	51
Figura 3.2	Esquema de incinerador de leito fluidizado.....	53
Figura 3.3	Fluxograma do processo CCBA de fabricação de agregado leve.....	59
Figura 3.4	Blocos de concreto usando agregado leve do processo CCBA	59
Figura 3.5	Morfologia das cinzas de lodo ampliadas.	61
Figura 3.6	Vista do pátio de pós-secagem do lodo digerido centrifugado.....	63
Figura 3.7	Queimadores de biogás da ERQ Leopoldina.....	68
Figura 3.8	Fluxograma do processo de produção do agregado leve de lodo	68
Figura 3.9	Vista interna da fábrica de ALL na ERQ Leopoldina	69
Figura 3.10	Ficha de controle operacional da produção de agregado leve	70
Figura 3.11	Agregado leve de lodo produzido na fábrica da ERQ Leopoldina.....	71
Figura 3.12	Argila expandida da Cinasita.....	71
Figura 3.13	Aspectos de corpos de prova de concretos com ALL.....	72

Figura 3.14	Aspecto geral das placas pré-moldadas usando ALL para armários	72
Figura 3.15	Montagem das placas.....	72
Figura 3.16	Aspecto dos armários prontos.....	73
Figura 3.17	Aspecto do piso do pátio de descarga de aço	73
Figura 3.18	Aspecto do piso do pátio para depósito de agregados	73
Figura 3.19	Aspecto do piso do pátio do almoxarifado.	74
Figura 3.20	Blocos articulados para pavimentação do pátio interno.	74
Figura 3.21	Estrutura em concreto armado da cabine.....	74
Figura 3.22	Aspecto do concreto fresco com ALL.....	75
Figura 3.23	Concretagem da laje de cobertura.....	75
Figura 3.24	Aspecto da concretagem	75
Figura 3.25	Laje de cobertura do Escritório Administrativo	76
Figura 3.26	Passarela para pedestres construída com pré-moldados de ALL.....	76
Figura 3.27	Enchimento dos vãos das lajes utilizando concreto de ALL	76
Figura 3.28	Fluxograma operações estudo TAY; SHOW produção de cimento.	79
Figura 3.29	Fluxograma de incorporação de pellets na fabricação de cimento.	82
Figura 3.30	Fluxograma do sistema de reciclagem de esgoto na cidade de Tóquio..	87
Figura 3.31	Estrutura de armazenagem de biossólidos.....	91
Figura 3.32	Estrutura simplificada de armazenagem.....	92
Figura 3.33	Estocagem a céu aberto com blocos de concreto como paredes	93
Figura 3.34	Galpão de estocagem em Southern Maine.....	93
Figura 4.1	Exemplo de matriz de decisão baseada em análise hierárquica.	108
Figura 4.2	Modelo hipotético de hierarquia para seleção de alternativas.....	109
Figura 5.1	Sistema Principal de Esgotos da RMSP.....	117
Figura 5.2	Fluxograma de processo da ETE ABC	120
Figura 5.3	Fluxograma de processo da ETE Barueri.....	120
Figura 5.4	Fluxograma de processo da ETE Parque Novo Mundo.	121
Figura 5.5	Fluxograma de processo da ETE São Miguel.	121
Figura 5.6	Fluxograma de processo da ETE Suzano.....	122
Figura 5.7	Distâncias rodoviárias médias dos trajetos de transporte de lodos.	133

Figura 5.8 Taxa de geração de material gradeado em 1 m ³ de esgoto.....	136
Figura 5.9 Taxa de geração de areia em 1 m ³ de esgoto.....	136
Figura 5.10 Taxa de geração de torta de lodo em 1 m ³ de esgoto.	137
Figura 5.11 Taxa de geração de SST removido em 1 m ³ de esgoto.	137
Figura 6.1 Curvas de difração de raios X	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Síntese das fontes de contaminação e efeitos sobre a saúde humana.....	27
Tabela 2.2	Principais parasitas presentes no lodo de esgotos	29
Tabela 2.3	Bactérias presentes em lodo de esgoto de decantação primária.....	30
Tabela 2.4	Principais vírus entéricos do lodo que podem afetar a saúde.....	30
Tabela 2.5	Concentração de agentes patogênicos em algumas amostras de lodo....	31
Tabela 2.6	Características gerais de alguns grupos de compostos orgânicos	33
Tabela 2.7	Faixas usuais de densidades e massas específicas de tipos de lodo	35
Tabela 2.8	Etapas, objetivos e principais processos do tratamento do lodo.	36
Tabela 2.9	Características do lodo ao longo das diversas etapas do tratamento....	38
Tabela 2.10	Composição típica do biogás.....	40
Tabela 2.11	Limites de concentração de microrganismos patogênicos.	47
Tabela 3.1	Composição parcial de uma cinza de lodo de esgoto.....	53
Tabela 3.2	Composição química em massa percentual	80
Tabela 3.3	Propriedades dos blocos cerâmicos de pesquisas com de lodo.....	85
Tabela 3.4	Cuidados necessários no transporte de biossólidos.....	90
Tabela 3.5	Principais componentes gasosos de pirólise do lodo	95
Tabela 5.1	Sinopse das unidades de cada estação da RMSP.	119
Tabela 5.2	Comparação das vazões tratadas de esgotos (2002) e perspectivas....	128
Tabela 5.3	Produção e disposição de tortas de esgoto na Europa e EUA.....	128
Tabela 5.4	Dados operacionais do Sistema de Esgoto da RMSP.	131
Tabela 5.5	Taxa de sólidos em suspensão totais.	134
Tabela 5.6	Condicionadores químicos para 01 tonelada de lodo base úmida.....	135
Tabela 6.1	Índices físicos de resíduos de ETE.....	144
Tabela 6.2	Teor de sólidos, umidade, voláteis e não voláteis resíduos de ETE....	146
Tabela 6.3	Análise química das tortas de lodo das ETES Barueri e Suzano	147
Tabela 6.4	Análise química complementar e poder calorífico.....	148
Tabela 6.5	Reações determinadas na torta de lodo.	152

Tabela 6.6 Perdas de massa determinadas na torta de lodo	152
Tabela 6.7 Resultados da análise dos péletes pela NBR 10004.....	153
Tabela 6.8 Parâmetros complementares na massa bruta dos péletes	154
Tabela 6.9 Variação do teor de metais em tortas de lodo de diferentes ETEs	155
Tabela 6.10Série histórica de metais em tortas de lodo da ETE Barueri.....	157
Tabela 6.11Série histórica de metais nos esgotos afluentes à ETE Barueri.....	159
Tabela 6.12Distribuição dos metais dentro das frações granulares do lodo.	162
Tabela 7.1 Setores e áreas dos especialistas consultados.....	167
Tabela 7.2 Alternativas com interesse nas tortas de lodo de esgoto	169
Tabela 7.3 Pontos positivos e negativos para reciclagem das tortas de lodo.....	170
Tabela 7.4 Escala para avaliação ambiental dos sistemas de reciclagem	172
Tabela 7.5 Significância dos aspectos ambientais	173
Tabela 7.6 Potencial de ocorrência dos aspectos nos sistemas de reciclagem	174
Tabela 7.7 Mensuração do desempenho ambiental do sistema A.....	175
Tabela 7.8 Mensuração do desempenho ambiental do sistema B.....	175
Tabela 7.9 Mensuração do desempenho ambiental do sistema C.....	175
Tabela 7.10Hierarquia dos sistemas de reciclagem pela avaliação ambiental	176
Tabela 7.11Graus de riscos envolvidos com os perigos	178
Tabela 7.12Riscos de saúde dos sistemas de reciclagem das tortas de lodo.....	179
Tabela 7.13Resumo da avaliação de mercado	181
Tabela 7.14Resumo da avaliação econômica.....	184
Tabela 7.15Análise hierárquica da avaliação econômica	185
Tabela 7.16Resumo das avaliações dos sistemas de reciclagem.	186

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar as opções para gestão dos resíduos de tratamento de esgoto que fossem técnica, ambiental, social e economicamente viáveis. O processo de tratamento de esgoto gera resíduos sólidos não-inertes, sendo que entre eles o lodo é o mais importante em virtude da quantidade gerada. Na Região Metropolitana de São Paulo todas as Estações de Tratamento de Esgotos possuem unidades de desidratação e dispõem seus resíduos em aterros sanitários. Entretanto, a disposição em aterros sanitários apresenta dois problemas: altos custos e escassez de áreas, seja pelo fim da vida útil desses aterros ou pela excessiva distância dessas áreas até as estações de tratamento. Hoje, o tratamento de esgoto na Região Metropolitana de São Paulo gera cerca de 120 mil t/ano de lodo, com uma previsão de 750 mil t/ano em 2015, considerando um teor de sólidos de 40%. Para a implantação de um processo de reciclagem é necessária uma metodologia que minimize os riscos de investimentos e selecione as alternativas realmente interessantes e exeqüíveis. A metodologia adotada neste trabalho possui etapas de levantamento de informações sobre o processo de geração e caracterização do resíduo e seleção de alternativas de reciclagem. Para definir as melhores alternativas a serem pesquisadas, foram realizadas entrevistas com profissionais de notório saber em setores ambiental, sanitário, industriais diversos, etc. As informações obtidas foram submetidas a uma análise hierárquica baseada em fatores técnicos, ambientais, ocupacionais, econômicos e mercadológicos. Estes fatores foram analisados através de um sistema matricial de decisão, atribuindo-se a cada um deles respectivos graus de importância. Como resultado obteve-se a seguinte lista de possíveis alternativas de reciclagem em ordem decrescente de interesse: agregado leve, produtos de cerâmica vermelha e cimento Portland. Assim esta lista estabelece indicações de viabilidade para pesquisa e desenvolvimento de novos produtos que incorporem o lodo de esgoto.

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate the options for the management of wastes generated from wastewater treatment plants, which were technically, environmentally, socially and economically feasible. The wastewater treatment process generates non-inert solid wastes among which the sludge is the most significant due to the amount produced. In the Metropolitan Region of São Paulo all Wastewater Treatment Plants have dewatering units and dispose of their wastes in sanitary landfills. However, the landfill disposal presents two problems: high costs and unavailability of facilities - either because of the end of their useful life or their great distance from the plants. Presently, the wastewater treatment plants in the Metropolitan Region of São Paulo generate approximately 120,000 tons/year of sludge, with a forecast for 750,000 tons/year in 2015. The recycling process needs a methodology that minimizes the risks of investments and select the really attractive and feasible alternatives. The methodology adopted in this work was divided into the following phases: collection of information about the sludge generation process, characterization of the wastes, and selection of the recycling alternatives. To define the best alternatives to be researched, several interviews were carried with people specialized in environmental, sanitation and industrial issues. The findings were submitted to an analytic hierarchy process based on technical, environmental, occupational, economic and commercial aspects, which were treated through a matricial system for decision making purposes, attributing to each aspect a score according to its importance. As a result, a list of possible recycling alternatives in descending order was obtained – lightweight aggregate, bricks and cement Portland, representing an indication in terms of feasibility for research and development of products incorporating wastewater sludges.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A concepção de desenvolvimento sustentável pode ser compreendida como a complexa coexistência de três processos: o desenvolvimento tecnológico, a manutenção das condições ambientais adequadas para a existência das diferentes formas de vida do planeta, e a garantia da continuidade em tempos futuros, tanto deste desenvolvimento tecnológico, como das condições ambientais necessárias à continuidade da vida. Infelizmente, o terceiro componente desta proposta trata de um tempo futuro, e por vezes o espírito imediatista do homem tende a protelar atitudes de preparo do futuro em detrimento de outras que tragam resultados num curto prazo.

É razoável inferir, então, que se pautar na perseguição da concretização deste dito desenvolvimento sustentável é a única alternativa de conceber a sobrevivência no planeta; isto é o mesmo que dizer que o desenvolvimento sustentável é condição *sine qua non* para o prosseguimento da vida.

Neste contexto, a relação vital do homem com a água tem sido objeto de importantes discussões e atitudes na atualidade, preocupadas com a redução da disponibilidade e da qualidade deste recurso natural. Cada vez mais a água para consumo humano vem exigindo maiores procedimentos no seu tratamento, atestando sua perda de qualidade ao longo do tempo. Simultaneamente, aumenta a busca pela água com o crescimento populacional e seu desenvolvimento tecnológico, agravando o descompasso com a sua oferta.

Maior demanda de água implica maiores quantidades de água usada e, conseqüentemente, contaminada sob a forma de esgotos sanitários que, por sua vez, retornam aos corpos d'água. Esses corpos d'água até poderiam incorporar essas águas poluídas, servindo de meio para a degradação de seus poluentes, sem perder

seus padrões de qualidade. Porém, sua capacidade de depuração é limitada e incompatível com as elevadas quantidades de poluentes geradas por grandes concentrações de população. Trata-se também de uma capacidade natural, cuja Natureza não previu em seu 'escopo original' a presença de determinadas substâncias sintéticas, fruto do desenvolvimento tecnológico da humanidade, para as quais não possui mecanismos de degradação.

Assim sendo, essas águas poluídas são tratadas para a retirada das substâncias poluentes antes de serem dispostas nos corpos receptores, procurando-se, assim, prejudicar o menos possível a qualidade de suas águas e consequentemente a qualidade da vida ali existente. Portanto, este tratamento está inserido na concepção do desenvolvimento sustentável.

Entretanto, esse mesmo tratamento, ambientalmente correto e necessário, apresenta controvérsias em sua estrutura atual. Como já mencionado, através dele são removidas as substâncias poluentes da água que, numa análise sistêmica, deveriam ser removidas do ambiente. Porém como a Lei da Indestrutibilidade da Matéria e Energia não é revogada apenas porque o homem realizou uma atividade ambientalmente correta, é imperativo questionar o paradeiro destas substâncias poluentes removidas no tratamento das águas já utilizadas.

Essas substâncias têm vários destinos. Por exemplo, na disposição oceânica, baseada na proporção de diluição, com o aporte do princípio matemático de limite, o impacto ambiental tenderia a zero. Contudo, parece que as comunidades aquáticas não responderam bem a essa equação, e hoje esta prática está desaparecendo mundialmente.

Existem também os aterros sanitários, onde as substâncias poluentes podem ser enterradas, ou seja, na busca da solução para o problema, escolhe-se uma área, executa-se um revestimento com um material impermeável que, a princípio, permita um tempo de armazenagem tendendo ao infinito, deposita-se o problema nessa espécie de embalagem e cobre-se com terra. Não se deve esquecer dos investimentos

em combustível fóssil para os veículos que transportam estas substâncias até o local escolhido, e o custo das áreas utilizadas, tendo nada como retorno. Porém, com sorte, a área pode se transformar num parque de recreação, nunca num solo produtivo. Com menos sorte pode desvalorizar as áreas adjacentes devido ao mau cheiro e aspecto visual, e o que é pior, pode contaminar o lençol freático. Nesse investimento, o balanço ambiental jamais é nivelado e, na melhor das hipóteses, é menos ruim do que parece, apenas atendendo às expectativas imediatistas. Hoje, entretanto, tais expectativas são frustradas pela objeção dos habitantes das circunvizinhanças em aceitar esses empreendimentos.

Essas substâncias também podem ser incineradas, o que em termos práticos significa consumir combustível e liberar poluentes na atmosfera, e ainda ter em mãos alguma quantidade de cinzas para dispor. A filtragem dos poluentes evitando que atinjam a atmosfera tem evoluído muito, mas mesmo se essa questão for considerada resolvida, ainda resta a questão do desenvolvimento sustentável, pois há a queima de combustível fóssil – recurso natural não-renovável – para produzir nada. O mínimo que se espera dessa empreitada é o aproveitamento das cinzas em algum setor produtivo da sociedade, incorporadas a algum material, não precisando serem enterradas.

Uma alternativa tem sido o uso na agricultura e no reflorestamento quando tais substâncias, que anteriormente poluíam a água, têm valor como nutriente para o solo, sem possibilidade de contaminá-lo. Se assim fosse, haveria o risco de simplesmente deslocar o poluente da água para o solo, contaminando o lençol freático. Para esta alternativa não se recomenda o uso de resíduos gerados por atividades industriais.

Para grandes centros urbanos, que além de densamente povoados, ainda contenham grandes áreas industriais, as quantidades e as características das substâncias removidas dos esgotos sanitários inviabilizam o seu aproveitamento no solo como solução constante de disposição final. Neste caso a reciclagem, através da incorporação desses resíduos em processos industriais, é uma solução coerente com a proposta de desenvolvimento sustentável, caso esses processos possam garantir:

- absorção contínua das quantidades desses poluentes;
- segurança ambiental, social e ocupacional;
- influências técnica e econômica nulas sobre o produto final, ou se possível contribuindo na redução do consumo de matéria-prima e energia, e até mesmo agregando valor.

A Região Metropolitana de São Paulo – RMSP se enquadra nessa situação. Trata-se de cerca de 17 milhões de habitantes (IBGE, 1996 apud ENGEVIX; LATIN CONSULT, 2000) e cerca de 3,6 mil indústrias de médio e grande porte cadastradas (FIESP, 2002). O sistema principal de esgotamento sanitário possui cinco Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs. O processo de tratamento de esgoto gera resíduos sólidos não-inertes, principalmente tortas de lodo, que são dispostos nos dois únicos aterros sanitários municipais existentes.

Entretanto, essa disposição em aterros sanitários tem dois problemas: os altos custos de disposição e a escassez de áreas, seja pelo fim da vida útil desses aterros ou pela excessiva distância dessas áreas até as estações de tratamento. Hoje, o tratamento de esgoto na Região Metropolitana de São Paulo gera cerca de 120 mil t/ano de torta de lodo e tem previsão de 715 mil t/ano em 2015, considerando um teor de sólidos de 40% (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998). A proximidade do encerramento dos aterros sanitários municipais, Bandeirantes e São João, obrigará o uso de aterros cada vez mais distantes, o que acarreta também aumento dos custos de transporte.

A Companhia de Saneamento Básico de São Paulo – Sabesp – além do fornecimento de água, é responsável pela coleta, transporte e tratamento de esgotos em quase todos os municípios da RMSP e, portanto, tem a incumbência da disposição final dos resíduos do tratamento de esgotos. Para isto tem desenvolvido trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, P&D, direcionados para o uso desses resíduos na agricultura e em áreas de reflorestamento.

Entendendo que a reciclagem é uma questão social, com implicações ambientais, técnicas e econômicas, suas diretrizes não podem ser baseadas em suposições

aleatórias e nem desprezar clássicas teorias de mercado. É neste contexto que esta dissertação está inserida.

Indagações como a busca da melhor alternativa de reciclagem para as 750 mil toneladas anuais de lodo da RMSP, volume equivalente a um edifício de 145 andares, não podem ter respostas a partir de intuições, meras cópias ‘tropicalizadas’ de soluções internacionais, ou de seqüências de tentativas e erros. Os riscos ambientais, riscos à saúde pública, e os investimentos financeiros envolvidos nesse empreendimento pedem uma abordagem científica do problema.

Além disto, do ponto de vista estratégico, a melhor solução é um conjunto de alternativas. Uma vez estabelecida uma relação com um determinado setor industrial, é necessário evitar a dependência em relação a este setor, e não se tornar refém de eventuais oscilações de mercado, o que deixaria uma empresa de saneamento ambiental – um serviço público essencial – em posição de risco constante e imprevisível, e essa vulnerabilidade na gestão de resíduos nas dimensões da RMSP é inadmissível. Assim, para permitir uma futura valorização do resíduo no mercado, é preciso adotar uma série de alternativas de disposição, proporcionando segurança ao gerador desse resíduo, permitindo administrar sua distribuição entre as várias alternativas, com base em decisões empresariais bem fundamentadas.

Tais alternativas incluem um grupo principal que aproveite o resíduo, e um segundo grupo que simplesmente cuide de sua disposição, agindo como alternativa de contingência.

Para iniciar o delineamento destes grupos de alternativas baseando-se em uma abordagem sistêmica, com caráter eminentemente multidisciplinar, esta dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, dispondo de uma linha de pesquisa específica para reciclagem de resíduos, cujo bom desempenho é notório e reconhecido. O reconhecimento da necessidade de um foco multidisciplinar também é traduzido neste trabalho pelas importantes colaborações

do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, ambos da EPUSP, além da Secretaria Estadual de Meio Ambiente de São Paulo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é investigar as possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da RMSP, com base em parâmetros técnicos, ambientais, sociais e econômicos.

1.1.2 Objetivos específicos

São pontuados os seguintes objetivos direcionados a um prosseguimento de estudos em P&D de produtos reciclados a partir dos resíduos de tratamento de esgotos da RMSP:

- descrever os processos de geração desses resíduos durante o tratamento dos esgotos, de forma a facilitar a participação efetiva de uma maior gama de profissionais tomando contato com este tema e envolvendo-se num processo de desenvolvimento de soluções;
- organizar e sistematizar o maior número possível de dados sobre os resíduos de tratamento de esgotos, por vezes difusos e desconhecidos da sociedade, e que são imprescindíveis à compreensão do problema e para a busca de soluções;
- divulgar alternativas, ainda não convencionais, de disposição destes resíduos, para romper as barreiras da estagnação com formas de disposição de uso corrente, porém não necessariamente mais adequadas ou até mesmo inexecutáveis num futuro próximo;
- buscar uma sinalização científica sobre novas alternativas de reciclagem desses resíduos, que indique tendências para melhor direcionar empreendimentos em P&D, incluindo o uso de ferramentas que considerem os impactos ambientais.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Neste Capítulo 1, como já apresentado, constam a introdução, a justificativa e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 reúne um conjunto de informações do processo de geração dos resíduos, ou seja, uma apresentação sucinta sobre esgotos sanitários, a partir de sua coleta até o seu tratamento.

O capítulo 3 trata da disposição final dos resíduos do tratamento de esgotos, trazendo dados sobre os processos mais conhecidos e acrescentando alternativas de reciclagem destes resíduos em materiais de construção civil. Também são expostas breves considerações sobre análises ambientais, ocupacionais e de mercado.

O Capítulo 4 é a descrição da metodologia utilizada neste trabalho, onde são apresentadas as linhas gerais propostas por JOHN (2000), bem como os métodos desenvolvidos por ZORDAN (2003), para os quais os resíduos de tratamento de esgotos serviram de objeto de estudo, caracterizando uma interface com esta dissertação.

O Capítulo 5 é um levantamento panorâmico da situação atual em que estão inseridos os resíduos de tratamento de esgotos da RMSP, incluindo processos de geração e de destinação, quantidades, projeções, e estudos em andamento.

O Capítulo 6 é a caracterização física, química, mineralógica e ambiental de alguns resíduos do tratamento de esgotos da RMSP, complementados por séries históricas de análises laboratoriais efetuadas pelas próprias ETEs.

No Capítulo 7 estão organizados os dados levantados em entrevistas a especialistas da área de reciclagem e de alguns setores industriais, além do tratamento destes

dados e da classificação de alternativas encontradas, até então, para a reciclagem de lodo de esgoto.

O Capítulo 8 reserva considerações finais e a conclusão do trabalho.

CAPÍTULO 2

ESGOTOS SANITÁRIOS

Este capítulo reúne um conjunto de informações sobre os processos geradores dos resíduos que são o objeto desta dissertação. São expostos alguns conceitos e classificações do setor de saneamento com foco nos esgotos sanitários. Em cada uma destas classificações, os itens que tem uma maior relação com a Região Metropolitana de São Paulo são melhor detalhados.

Esta revisão visa fornecer noções básicas sobre Engenharia Sanitária capazes de subsidiar uma introdução na discussão sobre as possibilidades de reciclagem dos resíduos gerados no tratamento dos esgotos sanitários.

2.1 QUALIDADE DAS ÁGUAS E POLUIÇÃO

A qualidade da água, do ponto de vista ambiental, é definida pelas impurezas incorporadas por ela, devido às suas propriedades de solvente e à sua capacidade de transportar partículas.

A qualidade da água é função de condições naturais e da interferência do homem. A influência das condições naturais ocorre pelo contato da água das chuvas, em escoamento ou infiltração, com as partículas, substâncias e impurezas do solo. Dá-se assim a incorporação de sólidos em suspensão, como partículas de solo, e sólidos dissolvidos, como íons oriundos da dissolução de rochas. A interferência do homem ocorre pela introdução de compostos na água de forma concentrada, como despejos domésticos e industriais, ou de forma dispersa, aplicação de defensivos agrícolas no solo (VON SPERLING, 1996).

De toda água existente na Terra, apenas 0,8% pode ser mais facilmente utilizada para abastecimento público. Desta fração, 97% são águas subterrâneas e 3% são águas superficiais, daí a preocupação em evitar-se a contaminação da fração mais facilmente disponível.

A água está em movimento no planeta, e esta circulação é chamada de ciclo hidrológico, que é composto por mecanismos de precipitação, escoamento superficial, infiltração, evaporação e transpiração. Existem também ciclos internos, nos quais a água permanece no estado líquido, porém com suas características alteradas pela sua utilização. A Figura 2.1 apresenta um exemplo típico de ciclo do uso da água, no qual sua qualidade é alterada em cada etapa do percurso.

- Água bruta - Inicialmente, a água é retirada do rio, lago ou lençol subterrâneo, possuindo uma determinada qualidade
- Água tratada - Após a captação, a água sofre transformações durante o seu tratamento para se adequar aos usos previstos (ex.: abastecimento público ou industrial).
- Água usada (esgoto bruto) - Com a utilização da água, a mesma sofre novas transformações na sua qualidade, vindo a constituir-se em um despejo líquido.
- Esgoto tratado - Visando remover os seus principais poluentes, os despejos sofrem um tratamento antes de serem lançados ao corpo receptor. O tratamento dos esgotos é responsável por uma nova alteração na qualidade do líquido.
- Corpo receptor - O efluente do tratamento dos esgotos atinge o corpo receptor, onde, face à diluição e mecanismos de autodepuração, a qualidade da água volta a sofrer novas modificações.

Figura 2.1 Ciclo do uso da água (VON SPERLING, 1996).

As impurezas presentes na água podem ser retratadas por suas características físicas, químicas e biológicas. A Figura 2.2 esquematiza estas características.

Figura 2.2 Impurezas contidas na água (BARNES et al, 1981 apud VON SPERLING, 1996).

Com exceção dos gases dissolvidos, todas as impurezas da água contribuem para a carga de sólidos. Estes podem ser classificados fisicamente, pelo tamanho e estado das partículas conforme Figura 2.3, e quimicamente, em orgânicos (sólidos voláteis) e inorgânicos (sólidos fixos).

Figura 2.3 Classificação e distribuição dos sólidos em função do tamanho (VON SPERLING, 1996).

Quanto às características biológicas, os seres presentes na água podem estar vivos ou mortos e pertencerem a diferentes reinos, porém os microrganismos são os que assumem maior importância dada sua predominância em determinados ambientes, sua atuação nos processos de depuração dos despejos e sua associação com as doenças relacionadas à água. Entre eles estão bactérias, algas, fungos, protozoários, vírus e helmintos.

A qualidade da água pode ser analisada através de parâmetros que representam suas características físicas, químicas e biológicas. Os principais parâmetros físicos são cor, turbidez, sabor, e temperatura. Dentre os principais parâmetros químicos estão pH, alcalinidade, acidez, dureza, ferro e manganês, cloretos, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido, matéria orgânica, micropoluentes inorgânicos, e micropoluentes orgânicos. Quanto aos parâmetros biológicos, estes estão relacionados às funções fundamentais de transformação da matéria dentro dos ciclos biogeoquímicos e à possibilidade de transmissão de doenças. Entre outros parâmetros, a averiguação do risco de transmissão de doenças pode ser efetuada de forma indireta, através dos organismos indicadores de contaminação fecal, pertencentes principalmente ao grupo dos coliformes (VON SPERLING, 1996).

Os requisitos de qualidade de uma água dependem de seus usos previstos, e correspondem a um objetivo desejado. Além disto há uma padronização de qualidade de cunho legal, que deve ser seguido pelas entidades envolvidas com seu uso. De forma genérica há três tipos de padrão, também relacionados ao seu uso. O padrão de lançamento no corpo receptor e o padrão de qualidade do corpo receptor, ambos definidos no Brasil pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – nº 20, de 18/06/1986 (CONAMA, 1986). O terceiro padrão é a qualidade para determinado uso imediato, como potabilidade, que foi definido pela Portaria nº 1.469, de 29/12/00, do Ministério da Saúde (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2000).

A poluição das águas pode ser entendida como a introdução de substâncias ou de formas de energia que, direta ou indiretamente, alterem a natureza do corpo d'água de uma maneira tal que prejudique os legítimos usos que dele são feitos.

A introdução de matéria orgânica em um corpo d'água implica no consumo de oxigênio dissolvido para sua estabilização. Esta estabilização é realizada pelas bactérias decompositoras, que utilizam o oxigênio disponível no meio líquido para a sua respiração. A queda da concentração do oxigênio dissolvido tem uma série de implicações ambientais, sendo esta o principal problema da poluição das águas por esgotos.

Associado ao fenômeno de consumo do oxigênio dissolvido está o fenômeno da autodepuração, através do qual o curso d'água tem seu equilíbrio restabelecido, por mecanismos essencialmente naturais, após as alterações induzidas pelos despejos afluentes. Numa visão específica, os compostos orgânicos são convertidos em compostos inertes e não prejudiciais do ponto de vista ecológico (VON SPERLING, 1996).

Entretanto, da mesma forma que a poluição, o conceito de autodepuração está relacionado com o uso previsto para esta água, que pode ser considerada depurada mesmo que não esteja totalmente purificada em termos higiênicos. Até porque não existe uma depuração absoluta: o ecossistema se reequilibra, mas em condições diferentes, mediante um incremento da concentração de produtos e subprodutos da decomposição, alterando a forma da comunidade aquática, em novo equilíbrio.

Assim se fazem necessários o conhecimento e a quantificação do fenômeno de autodepuração, de modo a utilizar a capacidade de assimilação dos rios e impedir o lançamento de despejos além do que o corpo d'água possa suportar.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ESGOTOS

Os esgotos de uma cidade que contribuem para uma Estação de Tratamento de Esgotos – ETE – são basicamente de três fontes distintas: esgotos domésticos, águas de infiltração (através de tubos defeituosos, conexões, juntas ou paredes de poços de visita) e despejos industriais.

Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água. A fração restante, 0,1%, inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, em suspensão e dissolvidos, bem como microrganismos, e constitui a causa da necessidade de tratamento dos esgotos. Vide Figura 2.4.

Figura 2.4 Sólidos nos esgotos (VON SPERLING, 1996).

Sendo as características do esgoto resultantes do uso sofrido pela água, a determinação dos compostos presentes é dificultada pela especificidade e diversidade de testes em laboratório. Assim são utilizados parâmetros indiretos que refletem o caráter ou o potencial poluidor do despejo, em termos físicos, químicos e biológicos.

Os principais parâmetros para esgotos predominantemente domésticos são: sólidos, indicadores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e indicadores de contaminação fecal (VON SPERLING, 1996).

2.2.1 Sólidos

Os sólidos podem ser classificados pelo seu tamanho e estado, em suspensão e dissolvidos; pelas características químicas, em voláteis e fixos; e também pela sedimentabilidade, em sedimentáveis e não sedimentáveis, após período de 1 hora num recipiente denominado cone Imhoff. A Figura 2.5 apresenta uma distribuição típica dos sólidos de esgoto bruto.

Figura 2.5 Distribuição aproximada dos sólidos do esgoto bruto, em termos de concentração (VON SPERLING, 1996).

2.2.2 Matéria orgânica carbonácea

A matéria orgânica é uma característica muito importante nos esgotos, uma vez que os microrganismos que dela se alimentam consomem o oxigênio dissolvido na água. A matéria orgânica pode ser classificada quanto à forma e tamanho, em suspensão e dissolvida, e quanto à biodegradabilidade, em inerte (ou biorecalcitrante ou biorefratária) e biodegradável. Para sua determinação há métodos diretos de medição do carbono orgânico, como Carbono Orgânico Total (COT), e indiretos através de medição do consumo de oxigênio, como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Última de Oxigênio (DBO_u), e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), vide Figura 2.6.

Figura 2.6 Exemplo do conceito da DBO (VON SPERLING, 1996).

Representação esquemática simplificada e válida para águas. No caso de esgotos, alguns aspectos de ordem prática fazem com que o teste sofra algumas adaptações. Os esgotos, possuindo uma grande concentração de matéria orgânica, consomem rapidamente (bem antes de 5 dias) todo o oxigênio dissolvido no meio líquido. Assim, é necessário efetuar-se diluições para reduzir a concentração de matéria orgânica, possibilitando que o consumo de oxigênio a 5 dias seja numericamente inferior ao oxigênio disponível na amostra. Os esgotos domésticos possuem uma DBO da ordem de 300 mg/L, ou seja, 1 litro de esgoto consome aproximadamente 300 mg de oxigênio, em 5 dias, no processo de estabilização da matéria orgânica carbonácea.

2.2.3 Nitrogênio

No meio aquático, o nitrogênio pode ser encontrado como nitrogênio molecular (N_2), escapando para a atmosfera), nitrogênio orgânico (dissolvido ou em suspensão), nitrogênio amoniacal (NH_3 , livre, e NH_4^+ , ionizada), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-). Sua importância está relacionada com a geração e com o controle da poluição das águas por:

- ser indispensável ao crescimento de algas, podendo levar a eutrofização de lagos e represas;
- consumir oxigênio dissolvido nas conversões de amônia para nitrito, e deste para nitrato;
- ser tóxico aos peixes na forma de amônia livre;
- estar associado a doenças como a metahemoglobinemia, quando nitrato;
- ser indispensável aos microrganismos do tratamento de esgotos;
- etc.

Os nitrogênios orgânico e amoniacal são determinados juntos em laboratório sob a denominação de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). Por Nitrogênio Total (NT) entende-se a soma do nitrito e do nitrato ao NTK.

2.2.4 Fósforo

O fósforo apresenta-se na água sob duas formas principais: total e solúvel. É essencial para o crescimento de microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica, e também para o crescimento de algas, podendo levar a eutrofização dos corpos d'água.

2.2.5 Indicadores de contaminação fecal

A detecção dos agentes patogênicos, principalmente bactérias, protozoários e vírus, em uma amostra de água é extremamente difícil, devido às suas baixas concentrações. Assim sua determinação é feita através do estudo de organismos indicadores de contaminação fecal. Estes organismos não são patogênicos, porém indicam quando uma água está

contaminada por fezes humanas ou animais, bem como a sua potencialidade para transmitir doenças. Os organismos mais utilizados para este fim são as bactérias do grupo coliforme, e os principais indicadores são: coliformes totais (CT), coliformes fecais ou termotolerantes (CF) e estreptococos fecais (EF).

A *Giardia lamblia* e *Cryptosporidium parvum* estão entre os protozoários capazes de causar diarreias graves. Mais de cem surtos de gastroenterite por *Giardia* e *Cryptosporidium* foram relatados nos Estados Unidos, Canadá e países da Europa nos últimos 25 anos. Como os coliformes fecais não são bons indicadores da presença destes protozoários e o cloro não os elimina, a sua avaliação em águas é de extrema necessidade (CETESB, 2003).

2.2.6 Outros contaminantes

A contaminação por despejos industriais leva em consideração os seguintes aspectos no que concerne a tratamentos biológicos: biodegradabilidade, tratabilidade, concentração de matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes e toxidez. Para tratamento de esgotos domésticos e despejos industriais juntos numa mesma ETE, é necessário remover previamente dos despejos industriais os contaminantes que possam causar:

- toxidez ao tratamento biológico;
- toxidez ao tratamento do lodo e à sua disposição final;
- riscos à segurança e problemas na operação da rede de coleta e interceptação;
- presença do contaminante no efluente do tratamento biológico, quando o mesmo não puder ser removido pelo tratamento;
- volatilização de compostos orgânicos nos sistemas de transporte e tratamento.

2.3 ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Teoricamente o sistema de coleta e transporte coletivo dos esgotos no Brasil não inclui as águas pluviais, pois utiliza-se predominantemente o sistema separador absoluto de esgotamento sanitário, com linhas de drenagem independentes para águas de chuva e que não contribuem para a ETE, vide Figura 2.7. Entretanto, há locais onde a vazão aumenta em até vinte vezes em épocas de chuva.

Figura 2.7 Sistemas de esgotamento separador e combinado (VON SPERLING, 1996).

As unidades componentes de um sistema convencional de esgotamento sanitário, vide Figura 2.8, são:

- canalizações (ramal predial, coletor, coletor-tronco, interceptor e emissário);
- estações elevatórias;
- órgão complementares e acessórios (poço de visita)
- estações de tratamento de esgotos;
- disposição final;
- obras especiais.

Figura 2.8 Partes constitutivas do sistema convencional (VON SPERLING; MOREIRA da COSTA; CASTRO, 1995).

2.4 TRATAMENTO DE ESGOTOS

Os níveis de tratamento, bem como sua eficiência, delimitam a remoção dos poluentes de maneira a adequar o lançamento a uma qualidade desejada ou ao padrão de qualidade vigente.

Os níveis de tratamento são classificados em:

- **preliminar:** remoção de sólidos em suspensão grosseiros (materiais de maiores dimensões e areia);
- **primário:** remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e da DBO devido aos sólidos em suspensão (matéria orgânica dos sólidos em suspensão sedimentáveis);
- **secundário:** remoção da DBO em suspensão (matéria orgânica em suspensão fina, não removida no tratamento primário) e da DBO solúvel (matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos);
- **terciário:** remoção de nutrientes, patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e sólidos em suspensão remanescentes.

A remoção de nutrientes por processos biológicos e a remoção de patogênicos pode ser considerada como integrante do tratamento secundário, dependendo da concepção de tratamento local. O tratamento terciário é bastante raro no Brasil (VON SPERLING, 1996).

Os métodos de tratamento dividem-se em operações e processos unitários, e a integração destes compõe os sistemas de tratamento. METCALF; EDDY (1991) sugerem as seguintes definições:

- **operações unitárias:** métodos de tratamento nos quais predomina a aplicação de força física, como por exemplo gradeamento, peneiramento, mistura, floculação, sedimentação, flotação e filtração;
- **processos químicos unitários:** métodos de tratamento nos quais a remoção ou conversão de contaminantes ocorre devido a reações químicas, como por exemplo precipitação, adsorção e desinfecção;
- **processos biológicos unitários:** métodos de tratamento nos quais a remoção de contaminantes ocorre por meio de atividade biológica, como por exemplo remoção de matéria orgânica carbonácea, nitrificação e desnitrificação.

Este texto está direcionado aos tratamentos biológicos, uma vez que os tratamentos físico-químicos são mais utilizados para despejos industriais. Para a fase líquida que corresponde ao fluxo principal na ETE são listados os principais sistemas de tratamento em nível secundário correntes no Brasil:

- lagoas de estabilização e variantes, lagoas aeradas;
- sistemas de lodos ativados e variantes;
- sistemas aeróbios com biofilmes;
- sistemas anaeróbios com pós-tratamento;
- tratamento de esgotos no solo.

Em consonância com esta dissertação apenas as operações dos níveis preliminar, e os processos dos níveis primário e secundário referentes às ETEs da RMSP serão descritos.

2.4.1 Sistema de lodos ativados convencional

O sistema de lodos ativados convencional é composto por tanque de aeração (reator), tanque de decantação (decantador secundário), elevatória de recirculação de lodo, além do tratamento preliminar (grade e desarenador) e tratamento primário (decantador primário). A Figura 2.9 mostra seu fluxograma típico.

Figura 2.9 Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional (VON SPERLING, 1996).

No gradeamento, os materiais de maiores dimensões que o espaçamento das barras é retido, e pode ser removido de forma manual ou mecanizada.

No desarenador – caixa de areia ou caixa de areia aerada, que é a utilizada nas grandes ETEs – dá-se a remoção da areia por sedimentação. Os grãos de areia, por terem dimensões e densidade maiores, vão para o fundo do tanque, e a matéria orgânica, de sedimentação mais lenta, permanece em suspensão, seguindo para as próximas unidades.

Após a passagem nas unidades de tratamento preliminar, os esgotos chegam ao decantador primário contendo os sólidos em suspensão não grosseiros, na sua grande maioria matéria orgânica, os quais podem ser parcialmente removidos por sedimentação, o que significa a redução da carga de DBO encaminhada ao tratamento secundário. Assim os esgotos fluem lentamente pelo decantador primário, de modo que os sólidos sedimentem gradualmente no fundo. Essa massa de sólidos, denominada lodo primário bruto, é retirada por tubulação, ou raspadores mecânicos e bombas, e encaminhado para tratamento. Materiais flutuantes, como óleos e graxas, também são removidos para posterior tratamento.

O efluente decantado segue para o tratamento secundário, pelo qual a matéria orgânica não capturada nas unidades anteriores, dissolvida e em suspensão, é removida através de reações bioquímicas e físico-químicas realizadas por microrganismos. Baseado no efetivo contato da matéria orgânica com os microrganismos, estes convertem a matéria orgânica em gás carbônico, água e material celular (crescimento e reprodução dos microrganismos). Para tanto há a necessidade de oxigênio, bem como condições adequadas de pH, temperatura, tempo de contato, etc.

Nos tanques de aeração, os aeradores garantem o suprimento de oxigênio, além de criar um turbilhonamento, responsável pela manutenção dos sólidos em suspensão, e conseqüente melhoria no contato matéria orgânica e biomassa (bactérias), uma vez que ambos compõem os referidos sólidos em suspensão.

Apesar do aumento da eficiência de remoção da matéria orgânica proporcionada nos tanques de aeração, a mesma turbulência faz com que o efluente deste tanque tenha a biomassa em suspensão, uma outra forma de DBO para o corpo receptor, mesmo assim um poluente. Por isto antes do lançamento, há a necessidade de uma unidade que permita a sedimentação destes sólidos, o decantador secundário. As bactérias ao morrerem liberam polímeros extra-celulares que proporcionam a floculação biológica, favorecendo a sedimentação.

O princípio básico do sistema de lodos ativados convencional é o aumento da concentração da biomassa (bactérias) em suspensão no tanque de aeração. Como no decantador secundário há um verdadeiro reservatório de bactérias ativas, estas são recirculadas do fundo do decantador, por bombeamento, para o tanque de aeração, mantendo a relação alimento/microrganismo constante. Quanto mais bactérias houver em suspensão, maior será a avidéz por alimento, isto é, maior será a assimilação da matéria orgânica contida no esgoto bruto.

Neste sistema o tempo de detenção do líquido é baixo, de 6 a 8 horas, o que permite que o volume do tanque seja bem reduzido. Porém devido à recirculação, os sólidos permanecem mais tempo no sistema, cerca de 4 a 10 dias (idade do lodo). E é graças a este maior tempo

de permanência que a eficiência superior deste sistema é assegurada, uma vez que a biomassa tem tempo suficiente para metabolizar praticamente toda a matéria orgânica dos esgotos (VON SPERLING, 1996).

Dado o contínuo crescimento das bactérias, o equilíbrio deste sistema deve ser garantido pela retirada de parte da biomassa, correspondente ao aumento proporcionado pela reprodução. Esta fração é chamada lodo biológico excedente, e pode ser extraído diretamente do tanque de aeração ou da linha de recirculação, e encaminhado para tratamento adicional.

2.5 LODO DE ESGOTOS

O tratamento dos subprodutos sólidos gerados nas diversas unidades é uma etapa essencial do tratamento de esgotos. Os subprodutos sólidos dos tratamentos biológicos são o material gradeado, a areia, a espuma, o lodo primário e o lodo secundário.

Apesar de na maior parte das etapas de manuseio, o lodo ser constituído de mais de 95% de água, por convenção é denominado fase sólida, distinguindo-se do fluxo do líquido em tratamento. Também é o principal em termos de volume e importância.

A gestão do lodo das ETEs apresenta um alto grau de complexidade, uma vez que extrapola os limites da estação, e um custo elevado, que pode variar de 20 a 60% dos gastos totais de operação. Não obstante, uma má gestão do lodo pode comprometer os benefícios sanitários e ambientais que são esperados do tratamento dos esgotos (VON SPERLING, ANDREOLI, 2001). O destino final adequado do lodo é a garantia da conclusão bem sucedida da adoção do sistema de saneamento, logo que não apenas a coleta e o afastamento dos esgotos sanitários são responsáveis pelos benefícios esperados.

Este tema inclusive é parte integrante da Agenda 21, Capítulo 21 “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos”, que traz as seguintes orientações: redução das quantidades geradas, maximização da reutilização e reciclagem, depósito e tratamento adequados, e ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos (BASE DE DADOS TROPICAL, 2003).

No caso de processos biológicos, parcela da matéria orgânica é absorvida e convertida, tornando-se parte da biomassa microbiana, o lodo secundário ou biológico. Como sua composição principal é de sólidos biológicos, também é chamado de biossólido. É tradição empregar o termo biossólido quando é possível dar um destino benéfico para este lodo, através de características químicas e biológicas adequadas que propiciem seu aproveitamento, por exemplo na agricultura, reflorestamento e recuperação de áreas degradadas, não representando uma disposição final improdutiva (VON SPERLING, ANDREOLI, 2001).

2.5.1 Características e Produção

No tratamento de esgotos por processos biológicos podem ser gerados os seguintes resíduos sólidos: material gradeado, areia, lodo primário, material peneirado, lodo secundário e espuma, como mostrado na Figura 2.9. O lodo é o maior objeto do presente estudo, pois é gerado em quantidades de massa e volume extremamente maiores que os demais subprodutos (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

A produção do lodo é função do sistema de tratamento da fase líquida. O esgoto bruto é recebido nos decantadores primários, que geram o **lodo primário**, composto de sólidos sedimentáveis. Na etapa biológica é gerado o **lodo secundário** ou **biológico**. Se os lodos primário e secundário forem enviados para o tratamento conjuntamente, tem-se o **lodo misto**. O descarte do lodo é a sua retirada da fase líquida. O lodo primário é retirado em intervalos de horas ou de forma contínua, e o lodo biológico é retirado continuamente. O lodo biológico descartado também é chamado de **lodo em excesso**.

Os sólidos removidos no gradeamento incluem todos os sólidos, orgânicos e inorgânicos, com dimensões superiores ao espaço livre entre as grades. O material orgânico varia em função das características do sistema de esgotamento e da época do ano. A remoção pode ser manual ou mecânica (METCALF; EDDY, 1991).

A areia usualmente compreende os sólidos inorgânicos mais pesados, que sedimentam com velocidades relativamente elevadas. A areia é removida em unidades denominadas desarenadores, aerados ou não, que são decantadores com um baixo tempo de detenção hidráulica, suficiente apenas para a sedimentação da areia. No entanto, em más condições de operação, podem ser removida, juntamente com a areia, matéria orgânica, como óleos e graxas (METCALF; EDDY, 1991).

Esta má operação impede que o resíduo seja disposto em aterro sanitário. Em ETEs maiores onde o mecanismo de aeração faz parte desta operação, o controle de maior ou menor fornecimento de ar comprimido às caixas de areia é função da relação entre sólidos totais e sólidos voláteis, de maneira a proporcionar eficácia na remoção da areia separando-a da matéria orgânica.

Os sólidos removidos por sedimentação nos decantadores primários constituem o lodo primário. Este pode exalar um forte odor, principalmente se ficar retido por um tempo elevado nos decantadores, em condições de elevada temperatura (METCALF; EDDY, 1991).

O material peneirado é obtido quando não há decantadores primários. A fase líquida proveniente do gradeamento, ao invés de seguir para os decantadores primários, segue para um sistema de peneiras, nas quais ficam retidos sólidos orgânicos e inorgânicos presentes nos esgotos com dimensões acima de 0,76mm, conforme a dimensão da malha do equipamento. Este material segue para caçambas, e posteriormente para aterro.

O lodo biológico em excesso, ou lodo secundário, compreende a biomassa de microrganismos aeróbios gerada às custas da remoção da matéria orgânica (alimento) dos esgotos. Esta biomassa está em constante crescimento, em virtude da entrada contínua de matéria orgânica nos reatores biológicos. Para manter o sistema em equilíbrio, aproximadamente a mesma massa de sólidos biológicos gerada deve ser removida do sistema. Caso o tempo de permanência dos sólidos no sistema seja baixo e haja satisfatória disponibilidade de alimento, os sólidos biológicos conterão maiores teores de matéria orgânica em sua composição celular. Estes sólidos não se encontram estabilizados (digeridos), necessitando de uma etapa separada,

posterior, de digestão. Caso contrário, haveria emissão de maus odores pelo lodo durante seu tratamento e disposição final, através da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, em condições não controladas (METCALF; EDDY, 1991).

A espuma removida nos decantadores primários consiste de materiais flutuantes raspados da superfície, contendo graxa, óleos vegetais e minerais, gordura animal, sabões, resíduos de comida, cascas de vegetais e frutas, cabelo, papel, algodão, pontas de cigarro e materiais similares. A massa específica da espuma é inferior a $1,0 \text{ g/cm}^3$, geralmente está em torno de $0,95 \text{ g/cm}^3$. Os desarenadores normalmente não possuem equipamentos para a remoção de espuma. No tratamento secundário, os reatores biológicos também produzem espuma, contando em sua composição com a presença de bactérias que se desenvolvem em condições ambientais específicas. Esta espuma é usualmente removida nos decantadores secundários por raspagem da superfície (METCALF; EDDY, 1991).

2.5.2 Principais Contaminantes do Lodo

Ao longo do tratamento de esgotos, alguns componentes concentram-se em proporções variáveis no lodo. Da mesma forma que alguns componentes orgânicos e minerais conferem características benéficas ao lodo, outros podem ser indesejáveis do ponto de vista sanitário e ambiental. Estes podem ser agrupados da seguinte forma:

- metais pesados;
- microrganismos patogênicos;
- poluentes orgânicos.

A presença destes componentes é função da qualidade do esgoto bruto e do sistema de tratamento. Através de diversos processos de higienização, conforme a destinação prevista, os lodos podem ser desinfetados, de maneira a reduzir seus níveis de microrganismos patogênicos. Já os poluentes orgânicos e metais pesados requerem métodos de remoção considerados economicamente inviáveis, sendo a melhor estratégia evitar tal contaminação nos esgotos brutos (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

2.5.2.1 Metais pesados

Do ponto de vista ambiental, o metal pesado é aquele que, em determinadas concentrações e tempo de exposição, oferece risco à saúde humana e ao ambiente, prejudicando a atividade dos organismos vivos. Os principais elementos químicos enquadrados neste conceito são: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, e Zn. Tais elementos são encontrados naturalmente nos solos, porém em concentrações inferiores às consideradas tóxicas aos seres vivos. Alguns deles são necessários a organismos vivos, como As, Co, Cr, Cu, Se, Zn, porém esta necessidade se restringe a doses pequenas, daí o conceito de micronutrientes, como Zn, Mg, Co e Fe. Acima de determinadas concentrações limites, estes elementos tornam-se tóxicos. Já elementos como Pb, Hg, Cd não existem naturalmente em nenhum organismo, sendo sua presença prejudicial em qualquer concentração. A Tabela 2.1 apresenta de forma resumida as fontes de contaminação de alguns metais pesados e seus respectivos distúrbios à saúde humana (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

A presença de metais no esgoto está associada principalmente ao lançamento de despejos nas redes coletoras públicas por parte das indústrias de galvanoplastia, formulação de compostos orgânicos e inorgânicos, curtumes, farmacêutica, fundição, lavanderias, petróleo, e formulação de corantes e pigmentos.

Os esgotos sanitários, dada a formação de CO_2 e CH_4 pela ação de microrganismos, constituem um ambiente redutor, determinando as formas de manifestação de seus componentes, em maior ou menor solubilidade, o que por sua vez define o grau de remoção de metais do efluente tratado e sua concentração no lodo. As limitações deste processo dependem da qualidade do esgoto bruto, do sistema de tratamento e da qualidade desejada para o efluente tratado. Assim através destes parâmetros, bem como de simulações na ETE, pode-se estabelecer limites de carga de poluentes, possibilitando avaliar a recepção de despejos industriais na rede coletora, sem prejuízo para o tratamento biológico da estação. Entretanto apesar de todo um procedimento técnico e formal aplicado ao recebimento de despejos industriais, o problema é extremamente agravado pelos lançamentos clandestinos (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Tabela 2.1 Síntese das fontes de contaminação e efeitos sobre a saúde humana dos metais mais frequentes no meio ambiente (www.rossetti.eti.br; www.greenpeace.org.br apud CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Metal	Fontes de Contaminação	Efeitos sobre a saúde
Alumínio	Água, queijos fundidos, farinha branca de trigo, panelas de alumínio, embalagens de papel alumínio, cosméticos, antiácidos, pesticidas e antiperspirante, fermento de pão, sal.	Constipação intestinal, perda de energia, cólicas abdominais, hiperatividade infantil, perda de memória, dificuldade de aprendizado, osteoporose, raquitismo e convulsões. Doenças relacionadas: Alzheimer e Parkinson.
Arsênio	Óleos combustíveis, pesticidas e herbicidas, metalúrgicas, plantas marinhas e frutos do mar.	Transtornos gastrointestinais, espasmos músculo-viscerais, náuseas, diarreias, inflamações da boca e garganta, dores abdominais.
Bário	Água poluída, agrotóxicos, pesticidas e fertilizantes.	Hipertensão arterial, doenças cardiovasculares, fadiga e desânimo.
Cádmio	Cigarros, farinhas refinadas, materiais odontológicos, indústria de aço, efluentes gasosos industriais, fertilizantes, pesticidas, fungicidas, café e chá tratados com agrotóxicos, materiais cerâmicos, frutos do mar, farinha de ossos, solda, fundição e refinação de metais como zinco, chumbo e cobre. Derivados de Cádmio são usados em pigmentos em pinturas, baterias, processos de galvanoplastia, acumuladores, estabilizadores de pvc, reatores nucleares..	Metal cancerígeno, provoca elevação da pressão sanguínea e aumento do coração. Queda da imunidade. Aumento da próstata. Enfraquecimento ósseo. Dores nas articulações. Anemia. Enfizema pulmonar. Osteoporose. Perda de olfato. Perda do desempenho sexual.
Chumbo	Baterias de automóveis, tintas, combustíveis, vegetais tratados com agrotóxicos, fígado bovino, alimentos enlatados, cigarros, pesticidas, tinturas de cabelo, gás contendo chumbo, papel de jornal e anúncios coloridos, fertilizantes, cosméticos, cigarro, poluição do ar.	Irritabilidade e agressividade, indisposição, dores de cabeça, convulsões, fadiga, sangramento gengival, dores abdominais, náuseas, fraqueza muscular, abnubilção mental, perda de memórias, insônia, pesadelos, acidente vascular cerebral inespecífico, alterações de inteligência, osteoporose, doenças renais, anemias, problemas de coagulação. Afeta o sangue, rins, sistema digestivo e reprodutor. Agente teratogênico (que acarreta mutação genética).
Cromo	Curtição de couros, galvanoplastias	Dermatites, úlceras cutâneas, inflamação nasal, câncer de pulmão e perfuração do septo nasal.
Mercúrio	Termômetros, pesticidas e agrotóxicos amálgama dentária, água, garimpos, polidores, ceras, jóias, tintas, açúcar, tomate e pescado contaminados, explosivos, lâmpadas fluorescentes de mercúrio, cosméticos, produção e entrega de produtos derivados de petróleo, células de eletrolise do sal para a produção do cloro.	Depressão, fadiga, tremores, síndrome do pânico, parestesias, descontrole motor, andar lateral, dificuldade de fala, perda de memória, perda do desempenho sexual, estomatite, dentes soltos, dor e paralisia de extremidades, dor de cabeça, anorexia em crianças, alucinações, vômitos, dificuldades de mastigação, sudorese e perda do senso da dor.
Níquel	Utensílios de cozinha, baterias níquel-cádmio, jóias, cosméticos, óleos hidrogenados, trabalhadores de cerâmica, permanentes (cabelo) à frio, soldas.	Metal cancerígeno, pode causar: dermatite de contato, gengivites, erupções na pele, estomatite, tonturas, dores articulares, osteoporose e fadiga crônica.
Zinco	Metalurgia (fundição e refinação), indústrias recicladoras de chumbo	Sensações como paladar adocicado e secura na garganta, tosse, fraqueza, dor generalizada, arrepios, febre, náusea, vômito

2.5.2.2 Microrganismos patogênicos

Os cinco grupos de microrganismos patogênicos que podem estar presentes no lodo são: helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias. Sua procedência pode ser humana ou animal.

Seu risco à saúde humana e animal é devido à alta frequência de parasitismo na população, ao longo tempo de sobrevivência de helmintos no meio externo, e à baixíssima dose infectante.

O manuseio e o emprego de lodo de esgoto de origem doméstica, sem prévio tratamento de estabilização e higienização, podem possibilitar a infecção de homens e animais, pelos agentes patogênicos nele presentes, de forma direta, quer pela alimentação, quer por contato direto com o lodo, quer por inalação, e de forma indireta, através da água e de animais. O contato direto com o lodo e a inalação expõem a maior risco os trabalhadores de ETEs, distribuidores de lodo, agricultores, enfim trabalhadores que manipulem produtos líquidos, secos ou pastosos derivados do lodo (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Quando o lodo não tratado é depositado, os microrganismos patogênicos ficam na superfície do solo e dos vegetais, e o seu tempo de sobrevivência varia conforme sua própria capacidade de sobrevivência, textura e pH do solo, incidência de luz solar, temperatura ambiente, método de aplicação do lodo no solo, capacidade de retenção de água, e fauna microbiana do solo.

Os parasitas, cujos ovos (helmintos) e cistos (protozoários) podem ser encontrados nos lodos de esgoto, são listados na Tabela 2.2, bem como seus hospedeiros e sintomas causados.

A dose infectante é de apenas um ovo de helminto ou um cisto de protozoário para contaminar o hospedeiro. O tempo de sobrevivência de helmintos no solo pode variar de meses até 14 anos, e de 10 a 30 dias para protozoários (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Tabela 2.2 Principais parasitas cujos ovos ou cistos podem ser encontrados no lodo ou esgoto, hospedeiros normais e acidentais, e doenças causadas nestes hospedeiros (THOMAZ-SOCCOL; PAULINO; CASTRO, 2000 apud CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Grupo	Parasita	Hospedeiro	Sintomas principais
Nematóides	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Homem	Distúrbios digestivos, vômito, dor abdominal
	<i>Ascaris suum</i>	Suíno	Distúrbios digestivos e nutricionais, emagrecimento, tosse, febre
	<i>Ancylostoma duodenale</i>	Homem	Anemia, emagrecimento
	<i>Necator americanus</i>	Homem	Anemia, emagrecimento
	<i>Trichuris trichiura</i>	Homem	Diarréia, anemia, perda de peso, dor abdominal
	<i>Toxocara canis</i>	Cães, Homem	Emagrecimento, diarréia, febre, desconforto abdominal, sintomas neurológicos (larva migrans visceral)
	<i>Trichostrongylus axei</i>	Bovinos, Equinos, Homem	Gastrite, úlcera gástrica
Cestóides	<i>Taenia solium</i>	Homem, Suínos	Distúrbios digestivos, insônia, anorexia, dor abdominal, distúrbios nervosos, irritação, emagrecimento
	<i>Taenia saginata</i>	Homem, Bovinos	Distúrbios digestivos, insônia, anorexia, dor abdominal / emagrecimento
	<i>Hymenolepis nana</i>	Homem, Artrópodes	Diarréia, sinais nervosos
	<i>Hymenolepis diminuta</i>	Roedores, Artrópodes	Distúrbios digestivos
	<i>Echinococcus granulosus</i>	Cães, Ovinos, Homem	Distúrbios digestivos, hepáticos e pulmonares
Protozoários	<i>Entamoeba histolytica</i>	Homem	Enterite aguda
	<i>Giardia lamblia</i>	Homem, Cães, Gatos	Diarréia, perda de peso
	<i>Toxoplasma gondii</i>	Gatos, Homem, Mamíferos e Aves	Alterações de sistema nervoso, coriorretinite
	<i>Balantidium coli</i>	Homem, Suínos	Distúrbios digestivos
	<i>Cryptosporidium</i>	Homem, Bovinos	Gastroenterite

Os principais grupos de bactérias entéricas patogênicas, que podem representar risco à saúde humana e animal, são listados na Tabela 2.3. Podem ter como origem a flora intestinal humana e animal, o solo, o ar e a água.

Algumas bactérias persistem em animais infectados, os quais funcionam como reservatório. A dose mínima infectante é diferente entre os agentes patogênicos mas situa-se entre 10^2 - 10^6 . O tempo de sobrevivência das bactérias no solo pode variar de 5 a 90 dias (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Tabela 2.3 Bactérias presentes em lodo de esgoto de decantação primária (EPA, 1992; ADEME, 1998 apud CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Organismo	Doença	Reservatório (em animais)
<i>Salmonella paratyphi A, B, C</i>	Febre paratifoide	Mamíferos domésticos e selvagens, pássaros e tartarugas
<i>Salmonella typhi</i>	Febre tifóide	Mamíferos, aves domésticas e selvagens
<i>Salmonella spp</i>	Salmonelose	Bovinos e outros animais
<i>Shigella sonnei, S. flexneri, S. boydii, S. dysenteriae</i>	Disenteria	
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenterite	Aves domésticas e silvestres e mamíferos
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenterite	Animais domésticos, cachorros, gatos, aves
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenterite	Animais domésticos
<i>Leptospira spp</i>	Leptospirose	Mamíferos domésticos e selvagens, ratos

Os vírus patogênicos de origem doméstica encontrados no lodo são listados na Tabela 2.4.

A dose mínima infectante é da ordem de 10^2 vírus. O tempo de sobrevivência desses vírus no solo pode variar de 12 a 100 dias.

Tabela 2.4 Principais vírus entéricos encontrados em lodo de origem doméstica que podem afetar a saúde humana (ADEME, 1998 apud CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Vírus entéricos	Hospedeiro	Doenças
Vírus da hepatite A e E	Homem	Hepatite infecciosa
Rotavírus		Gastroenterite
Enterovírus		Meningite, encefalite, doenças respiratórias
Poliovírus		Poliomelite
Coxsackievirus		Meningite, pneumonia
Echovírus		Meningite, paralisia
Astrovírus		Gastroenterite
Calicivírus		Gastroenterite
Reovírus		Gastroenterite, infecções respiratórias

A quantidade de patógenos no lodo é função das características do esgoto bruto e do sistema de tratamento utilizado, que concentra no lodo a maior carga de microrganismos inicialmente presente no esgoto afluente, uma vez que na fase de separação os microrganismos aderem às partículas sólidas. A Tabela 2.5 apresenta algumas concentrações de patógenos. Também deve ser considerado os efeitos de desnaturalização no tratamento, que torna inviável parte dos patógenos presentes, ou seja, os torna desprovidos de sua infectividade.

Tabela 2.5 Concentração de agentes patogênicos em algumas amostras de lodo (FEIX; WIART, 1998, THOMAZ-SOCCOL et al, 2000 apud CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Agente patogênico	Tipo de lodo	Número de patógenos
Ovos de helmintos	Lodo primário	$10^3 - 10^4 / \text{kg MS}$
	Lodo digerido	$10^2 - 10^3 / \text{kg MS}$
	Lodo semi desidratado	$10^1 - 10^3 / \text{kg MS}$
	Lodo anaeróbio	$6,3 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^4 / \text{kg MS}$
Cistos de protozoários	Lodo primário	$7,7 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^6 / \text{kg MS}$
	Lodo digerido	$3 \cdot 10^4 - 4,1 \cdot 10^6 / \text{kg MS}$
	Lodo desidratado	$7 \cdot 10^1 - 10^2 / \text{kg MS}$
Bactérias	Lodo	$10^1 - 8,8 \cdot 10^6 / \text{kg MS}$
	Lodo ETE Belém – PR	$10^8 / \text{kg MS}$
Vírus	Lodo primário	$3,8 \cdot 10^3 - 1,2 \cdot 10^5 / \text{L}$
	Lodo digerido	$10^1 - 10^3 / \text{L}$
	Lodo biológico	$10^1 - 8,8 \cdot 10^6 / \text{kg MS}$

Observação: MS = massa seca

2.5.2.3 Poluentes orgânicos

A preocupação com compostos orgânicos perigosos está associada ao potencial de carcinogenicidade, mutagenicidade, teratogenicidade e risco substancial à saúde humana. Sua presença em sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário é relativamente recente, e as metodologias de análise não estão plenamente estabelecidas. Estas metodologias têm sido desenvolvidas e padronizadas para identificação qualitativa e quantitativa dos compostos orgânicos perigosos, subsidiando estudos de suas propriedades, bem como de métodos de remoção (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

No Brasil, por falta de recursos humanos e materiais, nem mesmo as técnicas de identificação e quantificação já padronizadas foram assimiladas adequadamente. Além do mais, quanto ao destino final dos resíduos gerados nas ETEs, as normas brasileiras consideram apenas a presença de metais pesados e microrganismos patogênicos, negligenciando os poluentes orgânicos e consequentemente sua problemática (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

A maioria dos projetos de ETEs é concebida em termos de remoção de DBO, DQO, SS e organismos patogênicos, não mencionando a remoção de poluentes orgânicos perigosos. Estes compostos são biodegradados muito lentamente, persistindo no ambiente por longo período de tempo. Devido a sua característica de bioacumulação, após lançados em corpos

d'água, eles podem penetrar na cadeia alimentar. Mesmo que alguns destes compostos não representem graves riscos à saúde, quando ingeridos, seus metabólitos podem ser mais tóxicos que os produtos originais. E há também o caráter sinérgico: uma vez que os esgotos contêm mais de um poluente, o efeito combinado pode ser maior que a soma dos efeitos individuais.

Além da presença de compostos orgânicos perigosos nos efluentes das ETEs que são lançados em corpos d'água, também é necessário atentar para seu comportamento dentro das ETEs e elevatórias. Vários poluentes perigosos são voláteis, podendo ser transferidos para a atmosfera nos tanques de aeração, equalização e decantadores, representando um risco potencial à saúde da população e dos operadores. Também podem ocorrer danos à integridade estrutural do sistema de coleta de esgotos, pois muitos compostos são corrosivos, inflamáveis e explosivos. E há poluentes que ficam adsorvidos, concentrando-se no flocos biológico e podem causar inibição na digestão do lodo ou gerar lodo com características perigosas.

São escassos os dados sobre comportamento dos poluentes perigosos dentro das ETEs, bem como das suas características físicas, químicas e bioquímicas. Pesquisas para identificação e remoção destes compostos, bem como o desenvolvimento de modelos de previsão para sua tratabilidade e destino durante as operações de tratamento são de extrema necessidade.

As principais fontes de compostos orgânicos são: indústria química, de plásticos, produtos mecânicos, farmacêuticas, formulação de pesticidas, ferro e aço, petróleo, lavanderias, postos de gasolina e indústrias da madeira (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

Os poluentes mais comuns nos efluentes industriais são: cianeto, fenol, cloreto de metileno, tolueno, etil benzeno, tricloroetileno, tetracloreto, clorofórmio, naftaleno, acroleína, xileno, cresóis, acetofenoma, anilina, acetato de etila, entre outros (CESÁRIO SILVA et al, 2001).

A avaliação dos efeitos fisiológicos causados no homem é muito complexa, pois depende de cada indivíduo, vias de exposição, concentrações e características do poluente, aspectos sinérgicos, etc. Diante desta dificuldade de abordagem, mesmo dos principais compostos, a Tabela 2.6 resume alguns dados sobre três grupos de compostos.

Tabela 2.6 Características gerais de alguns grupos de compostos orgânicos e seus efeitos tóxicos. Adaptado de CESÁRIO SILVA et al, 2001.

Grupo de compostos	Dados gerais
Solventes orgânicos	<ul style="list-style-type: none"> - afetam o sistema nervoso central e agem como depressores e anestésicos; - pode causar de narcose até morte por parada respiratória; - fadiga, cefaléia, náusea e depressão; - de irritação na pele até dermatite; - perigo de explosão em locais não ventilados.
Bifenilos Policlorados (PCBs)	<ul style="list-style-type: none"> - família de compostos usados como fluídos de transferência de calor, fluídos hidráulicos, plastificantes, retardadores de chama e diluentes orgânicos; - efeitos sobre reprodução e desenvolvimento ainda não estabelecidos para seres humanos; - efeitos carcinogênicos ainda não estabelecidos para seres humanos.
Pesticidas	<ul style="list-style-type: none"> - compostos fabricados para destruir alguma forma de vida; - não há muitos dados nacionais, mas apesar da toxicidade seletiva, sempre há algum efeito tóxico ao ser humano.

Inicialmente, hidrocarbonetos clorados, pesticidas e bifenilas policloradas eram os compostos mais estudados. Devido a aplicação de lodos no solo, outros compostos presentes nas ETes passaram a receber maior atenção, pois representam riscos ao solo, plantas e águas. Entre eles estão os ésteres ftalatos (dietil, dibutil), tolueno, fenol, naftaleno, metanos clorados, etanos, benzenos, acrilonitrila e hidroquinona. Os dados, até então conhecidos, sugerem que a maioria dos traços orgânicos podem estar presentes nos lodos geralmente em concentrações inferiores a 10 mg/kg porém, uma contribuição industrial específica pode aumentar dramaticamente as concentrações (MORITA, 1993 apud CESÁRIO SILVA et al, 2001).

2.5.3 Índices fundamentais das características dos lodos

Para a correta expressão das características dos lodos e uniformidade na linguagem são apresentados a seguir os índices mais usuais e suas relações.

2.5.3.1 Relação entre teor de sólidos e umidade

$$Umidade (\%) = 100 - Sólidos Secos (\%)$$

A umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo, e estas por sua vez influenciam seu manuseio e disposição final, bem como no seu volume. A relação entre a umidade e as propriedades mecânicas é a seguinte (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994 apud VON SPERLING; GONÇALVES, 2001):

- umidade de 100% a 75%: **lodo fluido**;
- umidade de 75% a 65%: **torta semi-sólida**;
- umidade de 65% a 40%: **sólido duro**;
- umidade de 40% a 15%: **lodo em grânulos**;
- umidade de 15% a 0%: **lodo desintegrado em pó fino**.

Em São Paulo também está sendo produzido lodo em grânulos – péletes – com umidade inferior a 10%.

A água no lodo pode ser dividida em quatro classes distintas, de acordo com a facilidade de separação (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994 apud VON SPERLING; GONÇALVES, 2001):

- **água livre**: pode ser removida por gravidade (adensamento ou flotação);
- **água adsorvida**: pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de floculante;
- **água capilar**: mantém-se adsorvida à fase sólida por força capilar, distinguindo-se da água adsorvida pela necessidade de uma força maior para sua separação;
- **água celular**: é parte da fase sólida e só pode ser removida através de uma mudança no estado de agregação da água, isto é, através de congelamento ou evaporação.

2.5.3.2 Sólidos totais, voláteis e fixos

O lodo é composto por sólidos e água. Os sólidos totais (ST) dividem-se em sólidos dissolvidos e sólidos em suspensão, sendo estes últimos maioria. Quanto à matéria orgânica, os sólidos totais se dividem em sólidos fixos ou inorgânicos (SF) e sólidos voláteis ou orgânicos (SV), sendo a relação (SV/ST) uma boa indicação do teor de matéria orgânica no lodo. A Tabela 2.7 apresenta estas características para lodos de fontes diferentes.

Tabela 2.7 Faixas usuais de densidades e massas específicas de alguns tipos de lodo. Adaptado de VON SPERLING; GONÇALVES, 2001.

Tipo de lodo	Relação SV/ ST	% ST	Densidade do lodo	Massa específica (kg/m³)
primário	0,75 – 0,80	2 – 6	1,02 – 1,03	1.020 – 1.030
secundário aeróbio	0,75 – 0,80	0,6 – 1,0	1,005 – 1,025	1.005 – 1.025
primário adensado	0,75 – 0,80	4 – 8	1,023 – 1,03	1.023 – 1.030
secundário adensado	0,75 – 0,80	2 – 7	1,007 – 1,03	1.007 – 1.030
misto adensado	0,75 – 0,80	3 – 8	1,02 – 1,03	1.020 – 1.030
misto digerido	0,60 – 0,65	3 – 6	1,03	1.030
desidratado	0,60 – 0,65	20 – 40	1,05 – 1,08	1.050 – 1.080

2.5.3.3 Remoção dos sólidos voláteis

O processo de digestão remove os sólidos orgânicos biodegradáveis. A eficiência desta remoção situa-se entre 40 e 55% de SV (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

2.5.3.4 Densidade do lodo

Uma vez que o lodo é composto por água (densidade igual a 1), sólidos fixos (densidade por volta de 2,5) e sólidos voláteis (densidade de aproximadamente 1), a densidade do lodo é função da distribuição relativa destes três componentes. Valores de densidade e massa específica correntes na literatura são apresentados na Tabela 2.7.

2.5.3.5 Expressão do teor de sólidos totais

O teor de sólidos é dado na forma de sólidos secos em relação ao lodo (sólidos + água). Pode ser expressa em mg/L, g/m³, ou ainda em porcentagem.

2.5.3.6 Carga de sólidos

A carga de sólidos do lodo é a massa de sólidos secos por unidade de tempo. É usualmente expressa em kg/dia.

2.5.3.7 Captura de sólidos

A captura dos sólidos é a recuperação de sólidos que não foram separados da fase líquida em diferentes etapas do tratamento do lodo. Sob a forma de sobrenadantes, drenados ou filtrados das unidades de separação das fases sólida e líquida, eles são retornados ao início do processo junto aos esgotos afluentes (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

2.5.4 Tratamento do lodo

Os sistemas de tratamento do lodo podem comportar diversas combinações de operações e processos unitários. As principais etapas sequenciais do gerenciamento do lodo, respectivos objetivos e alternativas de processos são apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 Etapas, objetivos e principais processos do tratamento do lodo. Adaptado de VON SPERLING; GONÇALVES, 2001.

Etapas	Adensamento (espessamento)	Estabilização	Condicionamento	Desidratação (desaguamento)	Higienização	Disposição Final
Objetivos	remoção de umidade (redução de volume)	remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)	preparação para a desidratação (principalmente mecânica)	remoção de umidade (redução de volume)	remoção de organismos patogênicos	destinação final dos subprodutos
Principais processos	adensamento por gravidade	digestão anaeróbia	condicionamento químico	leitos de secagem	adição de cal	Uso agrícola
	flotação	digestão aeróbia	condicionamento térmico	lagoas de lodo	tratamento térmico	Recuperação de áreas degradadas <i>Landfarming</i>
	centrífuga	tratamento térmico		filtro prensa	compostagem	(disposição no solo)
	filtro prensa de esteiras	estabilização química		centrífuga	oxidação úmida	Uso industrial (matéria-prima, combustível etc)
				filtro prensa de esteiras	outros (radiação gama, solarização etc)	Incineração
				filtro a vácuo		Oxidação úmida
				secagem térmica		Aterro sanitário

A adoção de cada uma das etapas no fluxograma do processamento do lodo depende das características do lodo gerado, isto é, do tratamento aplicado à fase líquida, como também da etapa subsequente de tratamento do lodo e da disposição final (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

O adensamento ou espessamento é um processo físico de concentração de sólidos que busca a redução da umidade e conseqüentemente do volume do lodo, o que por sua vez facilita as etapas seguintes.

A estabilização visa remover patógenos, facilitar a desidratação e reduzir os maus odores no processo de tratamento do lodo, através da remoção da matéria orgânica biodegradável.

O condicionamento é um processo preparatório, no qual produtos químicos (coagulantes, polieletrólitos) são adicionados ao lodo, visando aumentar a captura de sólidos nos processos de desidratação.

A desidratação ou desaguamento visa remover a água e reduzir ainda mais o volume do lodo, aproximando seu comportamento mecânico ao dos sólidos.

A desinfecção ou higienização é uma operação necessária caso o destino do lodo seja a agricultura, buscando complementar a digestão aeróbia ou anaeróbia na redução do nível de patógenos a patamares aceitáveis.

É possível combinar diversas seqüências de operações e processos unitários para configurar o fluxograma do processamento de lodo. A Figura 2.10 apresenta duas seqüências usuais para o sistema de lodos ativados convencional.

Figura 2.10 Fluxogramas usuais de tratamento e disposição do lodo (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

À medida que o lodo passa pelas diversas etapas do tratamento, suas características são alteradas, como pode ser visto na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 Características do lodo ao longo das diversas etapas do tratamento. Adaptado de VON SPERLING; GONÇALVES, 2001.

Sistema	Lodo removido da fase líquida	Lodo adensado		Lodo digerido		Lodo desidratado	
	Teor de sólidos secos (%)	Processo	Teor de sólidos secos (%)	Processo	Teor de sólidos secos (%)	Processo	Teor de sólidos secos (%)
Lodos ativados convencional							
Lodo primário	2 – 6	Gravidade	4 – 8	Anaeróbia	4 – 8	-	
Lodo secundário	0,6 – 1	Gravidade Flotação Centrífuga	2 – 3 2 – 5 3 – 7	Aeróbia	1,5 – 4	-	
Lodo misto	1 – 2	Gravidade Centrífuga	3 – 7 4 – 8	Anaeróbia	3 – 6	Leito secag. Filtro prensa Centrífuga Filtr. correia	30 – 40 25 – 35 20 – 30 20 - 25

2.5.5 Estabilização de Lodos

Os processos de estabilização visam a redução de patógenos, do risco de putrefação e consequentes odores ofensivos oriundos da fração biodegradável do lodo. Os processos podem ser divididos em:

- **estabilização biológica:** utilizando bactérias específicas para estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica, por processos de digestão anaeróbia ou aeróbia;
- **estabilização química:** oxidação química da matéria orgânica através da adição de produtos químicos;
- **estabilização térmica:** obtida a partir da ação do calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados.

Na RMSP, a digestão anaeróbia é o processo mais utilizado, e por isso é tratada aqui. É um processo bioquímico de múltiplos estágios, capaz de estabilizar diferentes tipos de matéria orgânica (LUDUVICE, 2001). Seus três estágios são:

- 1) enzimas quebram compostos orgânicos complexos, como celulose, proteínas e lipídios, em compostos solúveis, como ácidos graxos, álcoois, dióxido de carbono e nitrogênio amoniacal;
- 2) microrganismos convertem os produtos do primeiro estágio em ácido acético, propiônico, hidrogênio, dióxido de carbono, além de outros ácidos orgânicos de baixo peso molecular;
- 3) dois grupos de bactérias formadoras de metano entram em ação, um deles produz metano a partir de dióxido de carbono e hidrogênio, o outro realiza a conversão de acetatos em metano e bicarbonatos.

A presença dos microrganismos patogênicos é reduzida de forma considerável na digestão anaeróbia, fazendo desta uma barreira parcial entre estes microrganismos e o usuário do lodo, na redução dos riscos de transmissão de doenças.

Os digestores são reatores biológicos fechados, construídos em concreto armado ou aço. Seu formato tradicional é cilíndrico de fundo cônico, e desde a década de 80 há concepções em formato ovalado. São projetados ultimamente para um período de detenção de 18 a 25 dias (LUDUVICE, 2001).

O bom desempenho de um digestor depende da manutenção de um meio homogêneo em seu interior, o que é assegurado pelo uso de sistemas de mistura. A Figura 2.11 apresenta os principais sistemas de mistura.

Figura 2.11 Principais tipos de mistura utilizados em digestores anaeróbios (adaptado de FERREIRA, 1999 apud LUDUVICE, 2001).

Em ETEs de médio e grande porte é comum a utilização de dois digestores em série para otimização da própria digestão e também da desidratação do lodo. O digestor primário opera como um reator de mistura completa, estabilizando de forma acelerada a matéria orgânica, e o secundário responde pela separação das fases sólida e líquida (LUDUVICE, 2001).

O gás produzido durante o processo da digestão anaeróbia, chamado biogás, é em parte utilizado no próprio digestor para mistura, adensamento, ou aquecimento do lodo, e o excedente armazenado em gasômetros para processamento ou queima.

A Tabela 2.10 apresenta uma composição típica do biogás produzido por digestão anaeróbia. Quanto maior a concentração de metano, maior será o poder calorífico do biogás, por exemplo contendo cerca de 70% de metano, o poder calorífico é de aproximadamente 23.380 kJ/m³. A título de comparação, o gás natural, mistura de metano, propano e butano, tem um poder calorífico de 37.300 kJ/m³.

Tabela 2.10 Composição típica do biogás (LUDUVICE, 2001).

Gás	% (volume / volume)
Metano	62 a 70
Gás carbônico	30 a 38
Gás sulfídrico	50 a 3000 ppm
Nitrogênio	0,05 a 1,0
Oxigênio	0,022
Hidrogênio	< 0,01
Vapor d'água	saturação

2.5.6 Remoção da Água

A remoção da umidade é uma operação fundamental para a redução da massa e volume do lodo produzido na ETE, e conseqüente redução de custos de transporte e disposição. No fluxo do lodo em uma ETE pode haver duas etapas de remoção de umidade: o adensamento ou espessamento, e o desaguamento ou desidratação. O primeiro é mais utilizado nos processos de tratamento primário e lodos ativados, e o segundo para o lodo digerido.

Os principais processos utilizados para o adensamento do lodo são:

- adensadores por gravidade;
- flotores por ar dissolvido;
- centrífugas.

2.5.6.1 Adensadores por gravidade

A estrutura dos adensadores por gravidade é semelhante a estrutura de um decantador. O formato geralmente é circular, alimentação central, saída do lodo pelo fundo e saída do sobrenadante pela periferia. O lodo adensado segue para a digestão, por exemplo, enquanto que o sobrenadante retorna a entrada da estação. A Figura 2.12 apresenta um esquema típico de adensador por gravidade.

Figura 2.12 Corte esquemático de um adensador por gravidade (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

2.5.6.2 Flotadores por ar dissolvido

No processo de flotação por ar dissolvido, introduz-se ar em uma solução mantida em elevada pressão, logo o ar está dissolvido. Mediante despressurização, este ar é liberado na forma de pequenas bolhas, carreando as partículas sólidas do lodo para a superfície, de onde são removidas. Este processo tem boa aplicabilidade em lodos ativados, para os quais o adensamento por gravidade não ocorre de forma satisfatória (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

2.5.6.3 Condicionamento

Os processos mecânicos de desidratação são os mais utilizados em grandes ETEs de regiões metropolitanas, pois apesar de maiores custos, não requerem grandes áreas de instalação.

Por outro lado, lodos ativados ou mistos para serem concentrados a teores de sólidos acima de 4 ou 6 %, necessitam de um tratamento prévio de condicionamento, que aumente a aptidão à desidratação e a captura de sólidos.

O condicionamento neutraliza ou desestabiliza as forças químicas ou físicas atuantes nas partículas coloidais e no material particulado em suspensão imersos em meio líquido. Este processo de desestabilização permite que as partículas pequenas se juntem para formar agregados maiores, ou seja, os flocos (HAUG et al, 1992 apud MIKI, 1998). Isto é obtido através da formação de espécies poliméricas – polímeros de hidróxidos metálicos – chamada de coagulação/floculação por varredura (MIKI, 1998).

O condicionamento pode ser realizado pela adição de produtos químicos inorgânicos e, ou orgânicos, aplicados no lodo a montante da unidade de desidratação, e seu papel é o de favorecer a agregação das partículas de sólidos e a formação de flocos.

Os coagulantes inorgânicos mais comuns são: sulfato de alumínio, cloreto ferroso, cloreto férrico, sulfato ferroso, sulfato férrico, cal virgem, cal hidratada. Os mais utilizados são a cal e o cloreto férrico. Tratando-se de lodos digeridos provenientes de lodo misto, para desidratação em filtro prensa, o consumo de cloreto férrico pode variar de 40 a 100 kg/t e o consumo de cal virgem de 110 a 300 kg/t de lodo (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2001).

O cloreto férrico é hidrolisado na água, formando complexos de ferro e depois é transformado em precipitados, gerando agregação, além de reagir com a alcalinidade dos bicarbonatos do lodo, formando derivados dos complexos de hidróxidos de ferro que também atuam como floclantes. As soluções de cloreto férrico são empregadas nas concentrações recebidas do fornecedor, cerca de 30 a 40% (MIKI, 1998).

Após a adição do cloreto férrico pode ser introduzida a cal, objetivando principalmente o controle do pH, o controle dos odores e a higienização do lodo. A cal é encontrada no mercado como cal virgem (CaO) ou como cal hidratada (Ca(OH)₂). A cal virgem deve ser extinta com água antes de ser usada, convertendo-se em Ca(OH)₂, operação esta que libera

muito calor. A cal hidratada não necessita desta etapa, é mais disponível no mercado, porém é mais cara que a cal virgem. Assim, ETEs de grande porte, cujo consumo seja superior a 1 ou 2 t/dia, geralmente optam pela cal virgem.

O condicionamento químico inorgânico aumenta consideravelmente a massa de lodo a ser gerenciada na estação, pois as quantidades adicionadas de coagulantes são relativamente grandes e tornam-se parte das tortas de lodo produzidas. Apesar de estabilizar o lodo, o condicionamento químico contribui para a redução do potencial de queima para incineração (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

Os polieletrólitos são compostos orgânicos sintéticos de alto peso molecular que podem ser usados como coagulantes ou auxiliares de floculação. Dependendo da carga superficial predominante, podem ser classificados como catiônicos, aniônicos e não iônicos ou neutros. Os floculantes aniônicos com poliacrilamidas introduzem cargas negativas nas soluções aquosas, e as poliacrilamidas catiônicas carregam cargas positivas. Os polieletrólitos catiônicos são os mais utilizados, pois a maioria dos lodos possui cargas elétricas negativas. Podem ser encontrados no mercado sob a forma de pó ou líquidos. No caso dos polieletrólitos em pó a dissolução dos polímeros requer um sistema típico, considerando o pré-umidecimento do pó e o tempo de dissolução. Neste tempo as moléculas estendem-se e assumem um formato que lhes permite flocular o lodo.

A quantidade de polieletrólito a ser utilizada depende das características do lodo e dos processos mecânicos envolvidos, podendo variar de 0,2 a 15 kg/t de lodo, não implicando em ganho significativo de massa e volume no lodo, como ocorre no condicionamento inorgânico (MIKI, 1998).

Outros materiais poderiam ser utilizados como condicionadores, tais como resíduos de alto forno da indústria de cimento e de cal, ricos em cálcio e potássio, porém para obter-se a mesma elevação de pH da cal, seria necessária a adição do dobro da quantidade de cal. Cinzas de incineradores e carvão pulverizado também poderiam reduzir o consumo de cloreto férrico e cal (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

2.5.6.4 Desidratação

Os principais processos utilizados para a desidratação do lodo são:

- **naturais:** leitos de secagem; lagoas de lodo;
- **mecânicos:** centrífugas; filtros a vácuo; prensas desaguadoras; filtros prensa.

Como mencionado anteriormente, os processos mecânicos são mais adequados às grandes ETEs de áreas metropolitanas. Na RMSP o equipamento presente nas cinco principais estações é o filtro prensa. São equipamentos que operam por batelada, requerem operadores treinados, e têm alto grau de confiabilidade. Entre várias vantagens destaca-se a produção de uma torta com alta concentração de sólidos, superior aos demais equipamentos. No caso de lodo digerido proveniente de lodo misto, os valores ótimos de desempenho são 40% de sólidos em ciclos de 2h (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

O ciclo de operação do filtro prensa varia entre 3 a 5 horas, e pode ser dividido em três etapas básicas: enchimento, filtração sob pressão máxima, e descarga de torta. A Figura 2.13 apresenta um esquema típico da instalação de um filtro prensa.

Figura 2.13 Fluxograma da instalação de um filtro prensa para desidratação de lodos (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

2.5.6.5 Secagem térmica

O processo de secagem térmica é uma das mais eficientes e flexíveis formas de redução do teor de umidade das tortas de lodo, podendo controlar-se o teor de umidade desejado em função da destinação final.

Em condições ideais são necessários cerca de 2.600 kJ de energia para evaporar 1 kg de água presente no lodo. Em condições operacionais, este valor pode ser acrescido em até 100%. O consumo de energia depende das características do lodo e da eficiência do equipamento. Parte da energia pode ser fornecida por óleo combustível ou gás natural, porém no caso de digestão anaeróbia, o biogás gerado pode ser utilizado como combustível auxiliar.

O processo consiste no aquecimento do lodo em ambiente hermeticamente fechado, com a conseqüente evaporação e coleta da umidade presente, vide Figura 2.14. O lodo sai do secador sob a forma de péletes com diâmetro entre 2 a 5 mm e teor de sólidos acima de 90%. O líquido evaporado é condensado e retornado à entrada da ETE para tratamento. Os benefícios alcançados são:

- redução significativa no volume de lodo;
- redução no custo de transporte e estocagem;
- produto estabilizado facilmente estocado, manuseado e transportado;
- produto final praticamente livre de patógenos;
- preservação das propriedades agrícolas do lodo;
- não necessita equipamento especial para ser utilizado na agricultura;
- pode ser incinerado ou disposto em aterro sanitário;
- produto pode ser ensacado e distribuído pelo comércio varejista;
- facilitar os usos benéficos do lodo.

A receita representada pela revenda do produto final como biossólido classe A, caso a composição do produto seco seja adequada e exista mercado, pode auxiliar no equilíbrio financeiro da ETE, pagando parte das despesas de combustível para elevar a temperatura do lodo a pouco mais de 100°C (TEIXEIRA PINTO, 2001) (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

No entanto isto não ocorre na ETE São Miguel da RMSP, onde os pélletes produzidos nem mesmo estão sendo utilizados na agricultura, sendo dispostos em aterro sanitário. Lá o secador térmico pode ser visto apenas como uma condição *sine qua non* do financiamento internacional do Projeto Tietê. Conforme este projeto, o secador deveria constituir uma forma de redução do volume de lodo a ser transportado e disposto em aterro. Porém, com os lodos contaminados da RMSP esta alternativa tem se mostrado muito mais um problema do que uma solução, uma vez que é necessário manter este equipamento em funcionamento, e apenas o lodo da ETE Barueri tem se mostrado adequado. E adequado para o funcionamento do secador, pois a composição do pélete gerado não tem permitido a utilização na agricultura.

Figura 2.14 Esquema de funcionamento do processo de secagem térmica (LUDUVIC; FERNANDES; 2001).

A secagem tradicionalmente refere-se a lodos digeridos, porém há estudos de secagem de lodo bruto, implicando em menor custo de implantação, manutenção de maior teor de matéria orgânica e poder calorífico, agregando valor ao lodo como combustível (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

2.5.7 Higienização de Lodos

Os níveis de patogenicidade do lodo podem ser substancialmente reduzidos através de processos como a digestão anaeróbia, entretanto muitos parasitas intestinais e principalmente seus ovos são pouco afetados por processos de digestão convencionais, necessitando uma etapa complementar ou conjugada aos processos convencionais para a adequada redução dos níveis de riscos à saúde da população, de acordo com as exigências de cada tipo de utilização. Esta etapa é denominada higienização (TEIXEIRA PINTO, 2001).

A aplicação do lodo em parques e jardins de acesso público, ou sua reciclagem na agricultura possuem um nível maior de exigência sanitária do que outras alternativas de disposição como aterros sanitários ou incorporação em processos industriais. Sendo a agricultura uma alternativa importante, porém dependente de cuidados maiores em termos sanitários, cada país estabelece restrições de uso e/ou exigências de adequação do nível sanitário do lodo antes de sua disposição.

Por exemplo, a agência de proteção ambiental americana - USEPA - adotou duas classes de qualidade microbiológica do lodo conforme sua norma 40 CFR Part 503. O **lodo classe A** tem uso irrestrito, sendo produzido através de processos que garantam uma concentração de microrganismos abaixo do limite de detecção, vide Tabela 2.11, isto é, que tenham sido submetidos a um processo de higienização. O **lodo classe B**, produzido por processos convencionais de estabilização, possui algumas restrições para o uso agrícola, e deve apresentar uma concentração de coliformes fecais menor que 2.10^6 cfu/g ST (TEIXEIRA PINTO, 2001).

Tabela 2.11 Limites de densidade de microrganismos patogênicos, expressos em base seca, pela norma americana 40 CFR 503.

Microrganismo	EUA (40 CFR 503)
Coliformes fecais	< 1000 cfu/g ST
<i>Salmonellas</i>	< 3 NMP / 4 g ST
Enterovírus	< 1 NMP / 4 g ST
Ovos viáveis de helmintos	< 1 ovo viável / 4 g ST

cfu - unidade formadora de colônia

NMP - Número mais provável

ST - Sólidos totais

Os mecanismos de higienização do lodo podem ser por via térmica, via química e/ou biológica e por radiação Beta e Gama. Esta dissertação detém-se em dois processos de higienização, a calagem ou estabilização alcalina de lodos na fase líquida, e a secagem térmica, sendo este último já tratado anteriormente.

A calagem se dá pela adição de quantidade suficiente de cal ao lodo para aumentar o pH para 12, resultando em redução de microrganismos e da potencial ocorrência de odores. O “leite de cal”, oriundo da cal hidratada ou da extinção da cal virgem, permanece em contato com o lodo digerido no tanque de mistura por aproximadamente 30 minutos, onde após este período o lodo deve ser encaminhado para a desidratação (TEIXEIRA PINTO, 2001).

A dosagem de cal é função das características do lodo, variando de 190 a 350 kg Ca(OH)_2 por tonelada de sólidos secos para lodo ativado, e de 125 a 225 para lodo digerido. O lodo líquido tratado com cal é facilmente desidratado por meio mecanizado, adequando-se à disposição final (TEIXEIRA PINTO, 2001).

Outros processos, tais como incineração, são mais complexos e mais caros, e deveriam apenas ser usados quando o lodo não puder ser reciclado na agricultura devido a grande concentração de metais pesados ou produtos químicos orgânicos, ou quando, face às restrições legais para disposições benéficas, houver necessidade de redução drástica de volumes. Os produtos finais de processos, como a incineração e a oxidação úmida, são inertes e estéreis e podem ser incorporados a materiais de construção ou dispostos em aterros (TEIXEIRA PINTO, 2001).

CAPÍTULO 3

DISPOSIÇÃO FINAL DOS LODOS DE ESGOTOS

As diferentes práticas de disposição de lodo de esgoto no solo, de forma generalizada, eram agrupadas em duas categorias:

- **descarte**, quando as práticas utilizam o solo como substrato para decomposição do resíduo, ou como local de estocagem, sem tirar proveito de suas propriedades benéficas;
- **uso benéfico**, quando a aplicação objetiva beneficiar-se das propriedades do produto como fertilizante e condicionador de solo, e envolve práticas como a reciclagem agrícola e reflorestamento, o uso em recuperação de áreas degradadas e a produção de substratos de mudas e fertilizantes (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

Nesta dissertação a proposta de uso benéfico é ampliada para além do uso agrícola, mantendo-se a concepção de aproveitamento, porém não restrito apenas às alternativas de disposição no solo, e sim envolvendo também a incorporação em processos industriais, como por exemplo a fabricação de materiais de construção civil, e quaisquer outros processos que estejam baseados na utilização do lodo. Estabelecido este critério de classificação tem-se, então, os dois grupos anteriores, porém expandidos, de forma que em uso benéfico encontram-se as alternativas de disposição útil no solo e na indústria, e em descarte encontram-se as alternativas de disposição não produtiva no solo e a disposição oceânica.

3.1 PRINCIPAIS TIPOS DE TRANSFORMAÇÃO PARA DESCARTE DO LODO

O processo de urbanização, que favorece a formação de grandes áreas metropolitanas, impõe restrições às alternativas de disposição dos lodos, pois traz consigo escassez de aterros

próximos, aumento do custo de transporte, aumento do custo da disposição nos aterros disponíveis. Em países europeus e também no Japão, estes fatores associados a uma legislação restritiva e ao incentivo a reciclagem tem elevado em muito a condução do lodo para incineração. Apesar da redução dos riscos de contaminação do solo e da água, a incineração gera preocupações com respeito à poluição atmosférica e à disposição final segura da cinza residual (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

Os principais tipos de transformação e descarte de lodo são:

- secagem térmica;
- oxidação úmida;
- incineração;
- disposição em aterro sanitário.

As três primeiras alternativas produzem resíduos, que por sua vez exigem disposição final, de tal forma que apenas a disposição em aterro pode ser classificada como rota de disposição final.

A secagem térmica já foi tratada no item 2.5.6.5.

3.1.1 Oxidação úmida

A oxidação úmida é recomendada quando o efluente é diluído demais para ser incinerado e tóxico ou refratário para ser tratado biologicamente. Baseia-se na capacidade da matéria orgânica, dissolvida ou particulada presente no líquido, de ser oxidada a temperaturas entre 100°C e 374°C, o ponto crítico da água. O limite de 374°C é dado pela incapacidade da água existir na forma líquida acima desta temperatura, mesmo a pressões elevadas. O processo de oxidação é acelerado pela alta solubilidade do oxigênio em soluções aquosas a altas temperaturas. O processo é altamente eficiente na destruição da matéria orgânica presente em efluentes com teor de sólidos entre 1 a 20 %. A quantidade de matéria orgânica é suficiente para gerar calor capaz de manter a temperatura necessária sem o auxílio de fontes auxiliares de energia (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

A Figura 3.1 apresenta o esquema de um sistema de oxidação úmida com reator vertical. O lodo é bombeado ao reator WAO (iniciais de Wet Air Oxidation, oxidação por ar úmido em inglês), passando por um trocador de calor para elevação da temperatura. Após o tratamento, o efluente do reator segue para a separação das fases, de onde o lodo é encaminhado para a desidratação, 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 odoríficas. Uma das preocupações neste processo é a alta concentração de metais pesados na cinza residual.

Figura 3.1 Sistema de oxidação úmida convencional com reator vertical (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

3.1.2 Incineração

A incineração é o processo de estabilização de lodo que oferece maior redução no volume para disposição final. O volume de cinzas é da ordem de 4% do volume de lodo desidratado que entra no incinerador. A incineração implica na destruição das substâncias orgânicas presentes no lodo através de combustão, obtida na presença de excesso de oxigênio. Apesar

do elevado teor de matéria orgânica, o processo de combustão só atinge condições autógenas quando o teor de sólidos é superior a 35%. O poder calorífico do lodo é fundamental na redução do consumo de combustível. Os elementos combustíveis do lodo são carbono, enxofre, e hidrogênio, que existem sob a forma de gordura, carboidratos e proteínas. Os produtos da combustão completa do lodo são: vapor d'água, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e cinza inerte (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

Existem dois tipos de incineradores atualmente em uso no tratamento de lodos de esgotos:

- incinerador de múltiplas câmaras;
- incinerador de leito fluidizado.

O incinerador de múltiplas câmaras é subdividido em três zonas de combustão distintas: superior, intermediária e inferior, onde respectivamente ocorre a remoção final da umidade, a combustão, e o resfriamento. Este incinerador tende a ser menos utilizado dado seu custo de operação e a qualidade do ar liberado através da chaminé.

O incinerador de leito fluidizado é um vaso cilíndrico de câmara única com paredes refratárias. O leito fluidizado de areia, em contato com o lodo, retém as partículas orgânicas até a completa destruição. A operação em condições autógenas a temperatura superior a 815°C garante a completa destruição de compostos orgânicos voláteis a um custo competitivo (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

O controle da emissão atmosférica é obtido através da otimização do processo de combustão e da utilização de filtros. Os principais poluentes gasosos são:

- óxidos de nitrogênio (NO_x);
- produtos de combustão incompleta como monóxido de carbono (CO), dioxinas e furanos;
- gases ácidos como dióxido de enxofre, ácido clorídrico e ácido fluorídrico;
- compostos orgânicos voláteis como tolueno e solventes clorados.

Há também poluentes nas emissões atmosféricas na forma sólida, consistindo em matéria particulada fina composta de metais pesados e sólidos em suspensão particulados condensáveis à temperatura ambiente. Precipitadores eletrostáticos são usados na remoção do material particulado das emissões atmosféricas de incineradores. A Figura 3.2 apresenta o esquema de um incinerador de leito fluidizado com sistema de lavagem e resfriamento de gases.

Figura 3.2 Esquema de incinerador de leito fluidizado com sistema de lavagem e resfriamento de gases (Adaptado de CIWEM, 1999 apud LUDUVIC; FERNANDES, 2001).

A cinza residual consiste em material inerte inorgânico com considerável concentração de metais pesados. A Tabela 3.1 apresenta uma composição parcial de uma cinza de lodo.

Tabela 3.1 Composição parcial de uma cinza de lodo de esgoto (LUDUVIC; FERNANDES, 2001).

Componente	Composição (em massa seca)
SiO ₂	55 %
Al ₂ O ₃	18.4 %
P ₂ O ₅	6.9 %
Fe ₂ O ₃	5.8 %
CaO	5.4 %
Cu	650 mg/kg
Zn	450 mg/kg
Ni	100 mg/kg
Cd	11 mg/kg

Os riscos da disposição da cinza estão vinculados à possível lixiviação dos metais, o que torna desaconselhável sua disposição no solo, sendo mais indicado o uso de aterros sanitários. Há experiências no Japão de incorporação destas cinzas ao cimento, como forma definitiva de assegurar a retenção dos metais pesados (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

Pode-se também utilizar a co-incineração do lodo em fornos de cimento ou em termoelétricas que utilizam carvão mineral como combustível. Neste processo tem-se redução de custos de implantação, de operação e manutenção, pois estes passam a ser integrados à rotina da indústria, possibilitando uma redução do custo total. Adota-se o termo co-processamento quando se considera o aproveitamento do resíduo como matéria-prima e/ou combustível auxiliar.

3.1.3 Aterro sanitário

O aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, buscando evitar danos à saúde pública e minimizar os impactos ambientais. É operacionalizado pelo confinamento dos resíduos sólidos na menor área possível e intercalando-os com camadas de terra como cobertura. Não há interesse em aproveitamento dos nutrientes do lodo, este é confinado em células, sofre processo de biodegradação anaeróbia, e gera vários subprodutos como o metano e o chorume. Há duas modalidades de disposição:

- **aterro sanitário exclusivo**, que recebe apenas lodo, cujo teor de sólidos deve ser superior a 30% ou mesmo seco termicamente;
- **co-disposição com resíduos sólidos urbanos**, onde o lodo é misturado com resíduos sólidos urbanos.

A mistura do lodo com resíduos urbanos tende a acelerar o processo de biodegradação, porém implica na redução da vida útil do aterro, caso a quantidade de lodo a ser disposta seja significativa.

A norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 1987) classifica os resíduos sólidos em:

- Classe I: perigosos;

- Classe II: não inertes;
- Classe III: inertes.

Os lodos de esgotos, de acordo com esta norma, enquadram-se como Classe II, não inertes, e de fato análises de lixiviação pela norma NBR 10.005 (ABNT, 1997), de solubilização pela NBR 10.006 (ABNT, 1997) e de massa bruta pela NBR 10.007 (ABNT, 1997) de vários lodos mostraram que os lodos de forma genérica não são resíduos perigosos. Porém caso o esgoto seja muito contaminado por efluentes industriais, o lodo pode ter características de Classe I, e necessitar de aterros especiais.

Um aspecto importante para a instalação de um aterro é a disponibilidade de áreas adequadas próximas ao local de produção do lodo. Além do mais, há fatores ainda mais delicados, como a necessidade da aceitação do aterro por parte da população circunvizinha à área, a aprovação do Órgão Ambiental, e o atendimento a legislação vigente (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

Ao final da vida útil do aterro, ou seja, preenchimento total de seu volume, a área pode ser liberada para a instalação de parques, áreas verdes e campos esportivos. As construções devem ser evitadas, uma vez que os resíduos orgânicos continuarão sua decomposição por muitos anos, ocasionando recalques diferenciais.

3.1.4 *Landfarming*

Como mais um exemplo de disposição do lodo no solo sem fins benéficos tem-se o sistema conhecido como *landfarming* ou tratamento no solo. O objetivo é a biodegradação de resíduos orgânicos e retenção de metais na camada superficial do solo. Como o solo é utilizado como mero suporte, não havendo utilização dos nutrientes e da matéria orgânica para fins agrícolas, isto permite taxas de aplicações bem superiores, acompanhada de maior intervenção tecnológica no controle ambiental. No Brasil o *landfarming* tem sido utilizado em alguns poucos casos para resíduos industriais, como na refinaria Presidente Vargas da PETROBRÁS no Paraná (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

3.2 USOS BENÉFICOS DOS LODOS DE ESGOTOS

O uso dos lodos de esgotos na agricultura tem sido muito estudado e no Brasil já existem avanços nos estados de São Paulo, Paraná e Brasília. Algumas informações desta alternativa de uso benéfico dos lodos foram recolhidas e expostas nesta dissertação, porém de forma sucinta, uma vez que há vários estudos e literatura a este respeito (SANTOS, 2001). Já as alternativas de uso dos lodos em processos industriais são classificadas como tecnologias emergentes, portanto necessitando maiores estudos, o fato é que diferentes formas de reciclagem do lodo de esgoto como materiais de construção estão sendo sugeridas internacionalmente como alternativas seguras para o encapsulamento dos metais pesados, redução de emissões atmosféricas poluentes, redução dos volumes requeridos em aterros sanitários e conseqüentemente redução de custos, além de consistir numa forma de aproveitamento benéfico de matéria-prima e energia disponíveis, causando uma economia na extração destes recursos do ambiente, mesmo que em pequenas quantidades, e desta forma adequando-se ao modelo de desenvolvimento sustentável.

A partir da revisão bibliográfica foi possível distinguir três grupos de materiais de construção civil, nos quais o lodo de esgoto pode ser inserido no processo produtivo, a saber: agregados leves, cimento Portland e produtos de cerâmica vermelha.

3.2.1 Usos benéficos no solo

A composição do biossólido, dependente do esgoto que lhe deu origem. Para o caso de lodos ativados, a composição costuma apresentar em linhas gerais os seguintes teores percentuais de matéria seca: 2,25 a 9,15% de nitrogênio, 1,48 a 3,7% de fósforo e 0,01 a 0,36% de potássio. Para uma concentração balanceada de nutrientes conforme a demanda das plantas, geralmente é necessário o complemento do fósforo e do potássio. As quantidades de cálcio e magnésio costumam ser baixas, com exceção dos lodos tratados com cal. As quantidades de micronutrientes são variáveis, costumando apresentar quantidades apreciáveis de Cu, Zn e Mn e menores de B, Mo e Cl (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

A matéria orgânica presente no lodo também é de interesse para as aplicações no solo. A adição de material orgânico em solos argilosos, possibilita sua reestruturação, tornando-o

mais friável, aumentando a quantidade de poros e conseqüentemente a circulação de ar e água. Nos solos arenosos, a adição de material orgânico agrega as partículas do solo, formando torrões e possibilitando a retenção de maiores volumes de água. Também contribui na manutenção do pH uniforme e estável no solo (efeito tampão), na maior resistência à erosão, na melhoria da capacidade de troca de cátions, aumentando o reservatório de nutrientes, e no estímulo à atividade microbiana do solo (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

Entretanto, como grande parte dos metais pesados presentes no esgoto após o tratamento concentram-se no lodo, o controle sobre a qualidade dos diferentes tipos de efluentes lançados na rede coletora torna-se fundamental, quando o objetivo é destinar o lodo para aplicações benéficas no solo. Dependendo do processo industrial adotado pelas empresas, o lançamento de seus efluentes na rede coletora deve ser precedido de um pré-tratamento, para remoção de contaminantes que possam impossibilitar a reciclagem do lodo no solo.

As principais limitações da disposição benéfica no solo são os riscos de contaminação do solo com metais pesados, agentes patogênicos e uma ampla gama de compostos orgânicos, e a lixiviação de nitrogênio e fósforo, contaminando o lençol freático e as águas superficiais. Assim os riscos associados ao uso do biossólido referem-se ao conteúdo de metais pesados, microrganismos patogênicos, poluentes orgânicos, estabilidade e atração de vetores, e aptidão do solo, a qual integra a contaminação das águas, contato direto com pessoas e animais e a localização da área de aplicação.

A operacionalização de uma alternativa de uso benéfico no solo requer planejamento, organização, implementação e gerenciamento de um programa de reciclagem. Isto envolve etapas como: caracterização do biossólido, da área de aplicação, contexto sócio-econômico, organização da distribuição, licenciamento ambiental, divulgação, assistência técnica, e, principalmente, um sistema de controle de qualidade, uma vez que o gerador é sempre responsável pelos efeitos ambientais do seu resíduo. É importante que sejam registradas todas as áreas onde o lodo foi aplicado, com os respectivos lotes de origem e sua caracterização (TSUTIYA; COMPARINI; ALÉM SOBRINHO, 2001).

A União Européia (UE) e os EUA possuem leis que disciplinam o uso de bio sólidos na agricultura. No Brasil, o estado de São Paulo possui norma realizada pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB – desde 04/12/1999, a P-4.230 (CETESB, 1999). Esta norma teve como primeira referência a atual regulamentação americana para uso ou disposição dos bio sólidos derivados do esgoto sanitário, a 40 CFR Part 503 (Código de Regulamentos Federais nº 40, Seção 503), promulgada pela USEPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 1997). A cidade de Franca – SP – fundamentou-se na norma da CETESB para elaborar seu próprio manual para bio sólidos produzidos na ETE da SABESP, registrando-o como condicionador de solos (SABESFÉRTIL, 2000) no Ministério da Agricultura, sob cuja fiscalização faz sua aplicação em culturas de milho, café e reflorestamentos (TISUTYIA; COMPARINI; ALÉM SOBRINHO, 2001). O Paraná tem uma proposta de normalização sendo examinada pelo IAP – Instituto Ambiental do Paraná. O bio sólido das ETEs de Brasília é utilizado para a recuperação de áreas degradadas e para diversos usos agrícolas, sob as recomendações de um texto explicativo de suas propriedades e de como deve ser manejado e aplicado (SANTOS, 2001).

Em relação a São Paulo, o bio sólido da ETE de Franca está sendo utilizado em escala real, porém ainda não foram apresentados trabalhos de avaliação de impacto ambiental, com análises do solo, do lençol freático e até mesmo ocupacionais. Por outro lado, uma longa série de experimentos com os lodos da ETE Barueri, visando investigar a possibilidade de registrá-lo como bio sólido, também não contemplaram estudos de avaliação de impactos ambientais, ou pelo menos estes resultados ainda não foram publicados. Após esta ampla fase de estudos, as vantagens agronômicas são reconhecidas, porém é de altíssima importância atentar para as questões ambientais, cujas respostas é que definirão se é possível ou não usar o lodo dessa região metropolitana, densamente industrializada, na agricultura. Outra importante questão é quem será o consumidor deste bio sólido, qual sua aceitação pública, e quais as distâncias de transporte envolvidas entre a RMSP e a zona rural.

3.2.2 Fabricação de agregados leves

Entre vários trabalhos, internacionalmente é possível destacar aquele desenvolvido pelo Dr. George Harrison para a San Diego Region Water Reclamation Agency. Ele passou a produzir agregado leve a partir do lodo de esgoto por um processo chamado CCBA (Coordinate

Chemical Bonding Adsorption). O processo constava das etapas: 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; e queima entre 1070 a 1095 °C. A Figura 3.3 mostra o fluxograma deste processo.

Figura 3.3 Fluxograma do processo CCBA de fabricação de agregado leve (GEORGE, 1986)

O agregado leve produzido estava em conformidade com as normas da ASTM. A partir deste agregado obteve-se concretos de resistência a compressão acima de 35 MPa e blocos com mais de 6,5 MPa (GEORGE, 1986). A Figura 3.4 mostra esses blocos.

Figura 3.4 Blocos de concreto usando agregado leve do processo CCBA (GEORGE, 1986).

YIP; TAY (1990) investigaram misturas de argila e tortas de lodo, queimadas num forno para tijolos entre 800°C e 1080°C. O material queimado até 1000°C mostrou-se fraco e friável. A partir de 1000°C, o material ganhava resistência. Foi então quebrado e classificado por tamanho, originando agregados leves miúdos e graúdos muito angulares. A trabalhabilidade dos concretos com estes agregados era prejudicada, porém sua característica de agregado leve conferiu as mesmas características dos agregados leves comerciais, inclusive isolamento térmico, dada sua baixa condutividade térmica, além de resistência a altas temperaturas. TAY; YIP; SHOW (1991) repetiram o processo com várias proporções de argila e tortas de lodo, que após misturadas, foram queimadas num forno para tijolos entre 1050°C e 1080°C. O material queimado foi quebrado e classificado por tamanho. Os agregados leves mais resistentes resultaram de misturas com teores de argila superiores a 40% em massa.

Em cidades onde há escassez territorial, principalmente metrópoles asiáticas, a incineração é a forma mais comum de redução do volume das tortas de lodo. Porém isto implica na formação de cinzas, cujo volume é de 10 a 15% do volume das tortas, e para as quais também é necessário dar-se uma destinação. Pesquisadores como TAY (1997) de Singapura trabalham exaustivamente na busca de formas de aproveitamento destas cinzas em materiais de construção, fornecendo muitas informações, porém sempre partindo das cinzas do lodo, e por vezes transitando entre agregados leves e adições para concreto.

Um desses trabalhos propõe o uso destas cinzas como filler, isto é, com função de preenchimento e quimicamente inerte, substituindo parte do cimento em concretos. Para tanto as cinzas, resultantes da queima a 550°C, foram pulverizadas, selecionadas com diâmetro menor que 150 µm, e para um mesmo traço de concreto, foram investigadas quatro substituições na massa de cimento (5, 10, 15 e 20%), além da referência sem substituição. Foi notada melhoria na trabalhabilidade com maiores teores de substituição. Efeitos na segregação, tempos de início e fim de pega, retração e absorção de água não foram significativos. Quanto a resistência a compressão aos 28 dias, uma substituição de 10% de cimento implicou em queda de 10% da resistência, porém para substituição de 20%, a queda foi maior que 30% da resistência do concreto sem substituição (TAY, 1987).

BHATTY; REID (1989) investigaram o uso das cinzas de lodo da região de Minnesota, USA, como filler ou agregado miúdo em argamassas de cimento Portland. Porém face a sua alta porosidade, vide Figura 3.5, o consumo de água é elevado para alcançar a consistência especificada, reduzindo muito a resistência. O grau de finura das cinzas também contribuiu para isto. Cerca de 75% da cinza era menor que $70\text{ }\mu\text{m}$ e a superfície específica era $6070\text{ cm}^2/\text{g}$. Também foi registrado alto teor de fosfato, o que poderia vir a retardar a velocidade das reações do cimento, e a reatividade pozolânica era insignificante. Entretanto, KHANBILVARDI; AFSHARI (1995) registraram desempenho satisfatório no uso de cinzas de lodo como agregado miúdo em concretos de cimento Portland. Eles usaram lodo da região de Nova York.

Figura 3.5 Morfologia das cinzas de lodo ampliadas: (a) 90x, (b) 450x, e (c) 1800x.(BHATTY; REID, 1989).

Todas estas experiências, algumas em escala real, outras restritas a laboratório, mostram que é possível a produção de agregado leve usando-se unicamente lodo desidratado, ou misturado com argila, ou ainda a partir de cinzas de lodo incinerado. Esses agregados leves podem ser grãos e miúdos. A incorporação direta das cinzas como filler ou agregado miúdo em concretos, no caso de incineração dos lodos, também é uma opção.

O desempenho destes materiais depende da forma como o lodo se apresenta; cinzas usadas diretamente como agregados requerem alto teor de água, prejudicando a resistência. Depende também do processo de fabricação e das dosagens envolvidas, requerendo pesquisas para o desenvolvimento quer seja para a produção de uma linha de agregados inovadora, baseada em reciclagem do lodo, quer seja para a incorporação em um produto existente.

3.2.2.1 Experiência nacional

A pesquisa nacional sobre o aproveitamento do lodo de esgoto gerado nas estações de tratamento como material de construção iniciou-se em 1974, quando a Sabesp solicitou ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT – um estudo para aproveitamento deste resíduo. Os pesquisadores da Divisão de Tratamento de Minérios do IPT, Prof. Dr. Carlos Dias Brosch, Engº Silvio Benedicto Alvarinho, Engº Hiran Rodrigues de Souza e Engº Oscar de Nucci, efetuaram uma pesquisa experimental de aproveitamento do lodo digerido da Estação de Tratamento de Esgotos de Pinheiros. Esta pesquisa lhes conferiu o prêmio “Governador do Estado de São Paulo”, em 1976, de melhor invenção devido a sua originalidade e importância.

Eles conseguiram obter, a partir de lodo digerido, um material que após britagem era classificado dentro das especificações de agregado leve para fins de construção civil, com empregos em estruturas de concreto, isolamento térmico, enchimento de vazios, pré-fabricação de edifícios e blocos para alvenaria e pisos. Posteriormente, passou-se a um processamento piloto, ainda em operação descontínua no IPT e finalmente foi elaborado o projeto básico de uma instalação semi-industrial, produtora de ALL - Agregado Leve de Lodo - por sinterização. Esta instalação semi-industrial, implantada junto à ERQ Leopoldina (Estação Recuperadora da Qualidade das Águas), teve seu projeto industrial desenvolvido por empresas brasileira, com componentes mecânicos e elétricos de fabricação nacional, e esteve em operação de junho de 1979 até o final de 1982 (SANTOS, 1992).

Dada a ausência de documentação na própria Sabesp sobre este projeto, através desta revisão os relatórios da equipe do IPT, bem como o projeto completo da instalação semi-industrial foram levantados nos arquivos deste Instituto, agrupados e ordenados cronologicamente, e conduzidos ao acervo técnico desta empresa. Infelizmente os relatórios operacionais, em princípio arquivados na Sabesp, parecem ter sido destruídos como documentos velhos. A partir de um folheto informativo, foi possível obter as únicas imagens da instalação, bem como de algumas obras que usaram o ALL.

O processo de produção do agregado leve, a partir do lodo digerido dos esgotos, passava pelas seguintes operações unitárias (BROSCH; ALVARINHO; SOUZA, 1976; SANTOS, 2001):

1) Desidratação do lodo

O lodo proveniente da digestão anaeróbia, com cerca de 5% de sólidos, era bombeado para centrífugas, onde o teor de sólidos atingia 30%. O teor de matéria orgânica em base seca deste lodo era cerca de 57% da sua massa. Do total da fração inorgânica restante, em valores médios, os principais teores eram: 52% de SiO_2 , 27% de Al_2O_3 , 7% de Fe_2O_3 e 5% de CaO . Este alto teor de sílica era resultado da inexistência de um sistema de remoção de areia.

2) Pós-secagem do lodo centrifugado

Este lodo seguia por correias transportadoras para o pátio de pós-secagem, cujo piso era de asfalto, as paredes a meia altura favoreciam a aeração natural, e a cobertura de telhas transparentes permitia a passagem da luz solar, vide Figura 3.6. Neste pátio o lodo passava por secagem natural até atingir um teor de sólidos entre 40 e 54%. O manuseio era feito por um pequeno trator provido de pá frontal, que carregava o primeiro equipamento, uma moega que tinha acoplado na sua parte inferior um alimentador de disco.

Figura 3.6 Vista do pátio de pós-secagem do lodo digerido centrifugado.
Fonte: Folheto de divulgação Sabesp, 1982.

Na proposta inicial do IPT foi cogitada uma alternativa mais rápida de redução de umidade, através de túneis de secagem aproveitando-se os gases de saída.

3) Dosagem e mistura dos componentes

Do disco alimentador, o lodo era introduzido no misturador, e recebia parte do sinter de retorno em dosagens convenientes para a conformação da mistura com suas características de umidade. Após essa mistura, o material passava por um moinho para ser triturado e depois seguia por uma correia transportadora para o tambor pelletizador.

4) Pelotização

A operação de pelotização consistia da introdução da mistura de lodo e sinter em um tambor rotativo de baixa velocidade que, no percurso desde a boca de entrada até a boca de saída, transformava a mistura disforme em pequenas pelotas, cujo diâmetro máximo era de 4 mm. Essas pelotas tinham um teor de umidade nominal de 45% e densidade aparente de 800 kg/m³.

5) Secagem das pelotas por leito fluidizado

As pelotas eram encaminhadas através de uma correia transportadora para o leito fluidizado. Nesta unidade era insuflado ar por meio de um ventilador, ao mesmo tempo em que era queimado biogás procedente dos digestores anaeróbios.

Este ar aquecido atravessava uma placa perfurada no sentido de baixo para cima e mantinha as pelotas em estado de flutuação de tal maneira, que o teor de umidade das pelotas passava de 45% na entrada, para 10% na saída. Os pós finos que se originassem no interior do leito fluidizado eram, através de um exaustor, encaminhados a dois ciclones e daí se dirigiam para a saída do leito fluidizado, juntando-se ao produto seco pelletizado.

As pelotas ao saírem do leito fluidizado apresentavam as seguintes características principais:

- umidade 15%
- temperatura máxima 75 °C
- densidade aparente 700 kg/m³
- granulometria 0 a 4 mm

Através de um elevador de canecas elas eram transportadas até um silo de estocagem.

6) Sinterização

Ao lado do silo de estocagem das pelotas procedentes do leito fluidizado, existia um outro silo que continha um material chamado “sinter de cama”, resultante de bateladas anteriores. Sob estes silos deslocava-se um carrinho que recebia primeiramente uma parte do “sinter de cama” e a seguir nove partes de pelotas que seriam sinterizadas.

Este carrinho movimentava-se até posicionar-se sobre um dos dois sinterizadores e então descarregava seu conteúdo para o interior de um deles.

Um carro maçarico deslocava-se sobre o sinterizador carregado. Este carro possuía um maçarico de ignição que era alimentado pelo biogás dos digestores anaeróbios e consumia $50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ a uma pressão de 2000 mm de coluna d'água. Iniciada a ignição do sinterizador, ela autossustentava-se a cerca de 1000°C por 20 minutos, devido a combustão da matéria orgânica contida no lodo; o carro maçarico era desligado ao mesmo tempo em que ligava-se o sistema de exaustão dos gases de sinterização. O término da mesma era controlado por meio de um termógrafo e de uma curva de temperatura.

7) Quebramento e britagem do sinter

Uma vez terminada a sinterização, abriam-se as comportas laterais dos sinterizadores, descarregando-se os blocos sinterizados em um carrinho, que manualmente era empurrado sobre trilhos, até o sistema de britagem do sinter.

O carrinho era descarregado sobre uma grade onde era feita a quebra manual dos blocos de sinter. O material quebrado caía sobre uma peneira vibratória que possuía aberturas de 25 mm. O material maior que 25 mm era desviado para um britador de mandíbulas e após ser processado reunia-se com aquele que tinha atravessado as malhas da peneira vibratória, sendo, através de um elevador de canecas, encaminhado para a entrada do tambor

estabilizador. Este sinter que alimentava o estabilizador tinha as seguintes características:

- temperatura aproximada 250 °C
- densidade aparente 800 kg/m³
- granulometria 0 a 25 mm
- quantidade alimentada ... 1500 kg/h

8) Estabilização e classificação do sinter

A estabilização era a última etapa do processo e consistia fundamentalmente em submeter o sinter a uma abrasão recíproca dentro de um tambor giratório. Na saída do tambor estabilizador eram obtidos três produtos distintos:

- sinter de retorno;
- sinter de cama;
- sinter útil (agregado leve).

Estes três materiais eram classificados através de um sistema de peneiras rotatórias existentes no tambor estabilizador.

O **sinter de retorno**, cujas principais características eram:

- temperatura 150 °C
- capacidade de produção ... 375 kg/h
- granulometria 0 a 2,4 mm

Ele era encaminhado para um silo de estocagem e posteriormente ao misturador no início do processo para modificar a umidade do lodo procedente do pátio de pós-secagem.

O **sinter de cama** era encaminhado para um silo e era utilizado como falsa grelha no processo de sinterização, formando a cama das pelotas no sinterizador.

As principais características deste sinter de cama eram:

- capacidade de produção ... 125 kg/h
- densidade aparente 570 kg/m³
- granulometria 10 a 25 mm

O **sinter útil (agregado leve)** era o produto final acabado que era encaminhado por uma correia transportadora para o pátio de estocagem industrial.

As principais características do agregado leve eram:

- capacidade de produção ... 500 kg/h
- densidade aparente 570 kg/m³
- granulometria 2,4 a 10 mm

9) Recolhimento de pós

Durante as diversas fases da produção do agregado leve havia formação de finos em várias unidades do processo.

Estes finos eram aspirados por exaustores e retidos no filtro de manga, sendo daí, automaticamente descarregados e encaminhados ao silo de pó juntamente com o sinter de retorno.

10) Queima de gases

No processo de sinterização os gases eram aspirados por exaustores, passando antes por ciclones recolhedores de partículas. Logo após, eram incinerados em um queimador de gás que utilizava como combustível o biogás produzido nos digestores, vide Figura 3.7. No processo formava-se pequena quantidade de alcatrão, que poderia ser aproveitado.

Figura 3.7 Queimadores de biogás da ERQ Leopoldina.
Fonte: Folheto de divulgação Sabesp, 1982.

O fluxograma de todo o processo de fabricação do ALL é apresentado na Figura 3.8 e a Figura 3.9 é uma fotografia interna da fábrica.

Figura 3.8 Fluxograma do processo de produção do agregado leve de lodo (SANTOS, 1992).

Figura 3.9 Vista interna da fábrica de ALL na ERQ Leopoldina.
Fonte: Folheto de divulgação Sabesp, 1982.

11) Controle operacional

SANTOS (2001) divulgou uma planilha de controle da época com os dados de uma batelada, vide Figura 3.10.

Quantidade de lodo na moega alimentadora	kg	2.295
Concentração de sólidos do lodo na moega	%	39
Quantidade de finos de retorno no misturador	kg	1.050
Quantidade de lodo mais finos de retorno	kg	3.345
Massa no pelotizador com conc. Sólidos 58 %	kg	3.345
Massa no secador		
Pelotas secas (91% de sólidos)	kg	2.084
Água evaporada	kg	1.212
Pó	kg	45
Perdas	kg	4
		3.345
Massa no sinterizador		
5,34 cargas de pelotas secas Mais o sinter de cama	kg	2.084
Massa no estabilizador		
5,34 cargas de 255 kg cada Mais o sinter de cama Mais os finos do processo	kg	1.362
Agregado leve	kg	392
Duração da batelada	h	1:45

Figura 3.10 Cópia de uma ficha de controle operacional da produção de agregado leve.
 Obs.: Os dados desta ficha foram mantidos conforme o original, apesar dos números não fecharem um balanço de massa elementar.
 Fonte: Apontamentos de campo de 1980, não publicados pela Sabesp, e recolhidos por SANTOS (2001).

Nota-se que 2.295 kg de lodo geraram 392 kg de agregado leve, em quase 2 horas de operação, desprezando-se os finos. A capacidade nominal de produção da usina era de 500 kg/h de agregado leve, a partir de 2 t/h de lodo, conforme projeto. Logo, do ponto de vista do consumo de lodo, a usina era cerca de 50% menos eficiente que o previsto, porém tratava-se de uma unidade piloto, com vistas a aprimoramento em escala industrial.

12) Controle de qualidade

O controle de qualidade do ALL era feito pelos laboratórios do IPT e pelo laboratório de concreto da Sabesp. Os concretos feitos com o ALL, comparados com concretos de mesmo traço usando argila expandida Cinasita, única concorrente no mercado nacional na época, mostraram melhor trabalhabilidade, e quanto a resistência à compressão axial obtiveram valores máximos de 29 MPa, apenas cerca de 12% inferiores em relação aos concretos com argila expandida. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram respectivamente o ALL e a argila expandida da Cinasita. Devido a alta absorção do ALL, este era usado no estado saturado com superfície seca (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.11 Agregado leve de lodo produzido na fábrica da ERQ Leopoldina.

Figura 3.12 Argila expandida da Cinasita.

O ALL foi usado em obras da própria Sabesp, como mostram as Figuras 3.13 a 3.25.

Figura 3.13 Aspectos de corpos de prova de concretos com ALL (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.14 Aspecto geral das placas pré-moldadas usando ALL para os armários do vestiário dos funcionários (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.15 Montagem das placas (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.16 Aspecto dos armários prontos (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.17 Aspecto do piso do pátio de descarga de aço em concreto armado usando ALL (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.18 Aspecto do piso do pátio para depósito de agregados em concreto armado usando ALL (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.19 Aspecto do piso do pátio do almoxarifado em concreto armado usando ALL (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.20 Blocos articulados para pavimentação do pátio interno das Oficinas de Manutenção do Guarapiranga (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.21 Estrutura em concreto armado da cabine pressurizada para o exaustor da Oficina de Manutenção (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.22 Aspecto do concreto fresco com ALL (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.23 Concretagem da laje de cobertura (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.24 Aspecto da concretagem (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Figura 3.25 Laje de cobertura do Escritório Administrativo da Superintendência de Produção pronta (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

O ALL também foi usado no concreto das passarelas da Rodovia Anchieta, e como enchimento nas lajes rebaixadas do Shopping Ibirapuera, vide Figuras 3.26 e 3.27.

Figura 3.26 Passarela para pedestres construída com elementos pré-moldados feitos com ALL. Via Anchieta, São Paulo. Fonte: Folheto de divulgação Sabesp, 1982.

Figura 3.27 Enchimento dos vãos das lajes, utilizando concreto de ALL. *Shopping Center Ibirapuera*, São Paulo. Fonte: Folheto de divulgação Sabesp, 1982.

Em 1981, estava sendo desenvolvido um projeto para aplicação do ALL, na construção do Edifício de Administração da futura ETE Barueri, com concreto de $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$ (SIMONDI, YAMADA, SARDINHA, 1981).

Entre os depoimentos de funcionários mais antigos, o ALL também surgiu como objeto motivador de um estudo onde a Sabesprev, entidade previdenciária da Sabesp, subsidiária a construção de casas para funcionários. Estas casas estariam sendo projetadas para execução com placas pré-fabricadas com o agregado leve.

Do ponto de vista econômico, a primeira análise do IPT (BROSCH; ALVARINHO; SOUZA, 1976) expôs o seguinte cenário:

- custo do ALL, gestão de 3 turnos, cerca de US\$ 7,00/m³;
- preço da argila expandida posto em fábrica, cerca de US\$ 14,00/m³;
- custo de instalação de uma usina para 2 t/h de ALL, ou 3,5 m³/h, menos de US\$ 350 mil;
- faturamento mensal, cerca de US\$ 30 mil;
- renda bruta mensal, cerca de US\$ 15 mil;
- taxa de retorno do capital, cerca de 4,2 % ao mês.

Assim, na época, 12 t de lodo tornariam-se 3,5 m³ de ALL, gerando US\$ 24,50. Fazendo-se uma conversão grosseira para valores atuais a partir de R\$3,00/US\$, desprezando-se a evolução dos equipamentos, e intervenções cambiais ao longo destes 27 anos, o investimento inicial seria de aproximadamente R\$ 1 milhão.

Porém deve-se observar que o preço atual da argila expandida é aproximadamente R\$ 70,00/m³, cerca de US\$ 24,00/m³. Logo considerando-se os 50% de lucro na venda do ALL, do cenário delineado pelo IPT, e que atualmente a disposição em aterro das tortas de lodo custa por volta de R\$ 70,00/t, 1 tonelada de lodo deixaria de custar para a Sabesp estes R\$70,00 e os 0,30 m³ de ALL produzidos por esta 1 tonelada de lodo significariam uma renda de aproximadamente R\$ 10,00. Deve-se também levar em conta que unidades de produção maiores proporcionariam menores custos.

Não foram encontrados documentos que expliquem os fatores que determinaram sua desativação. Informalmente, funcionários da empresa atribuem o encerramento das atividades da fábrica de agregado leve à uma mudança político-partidária na sucessão do Governo do Estado de São Paulo, e em nada relacionada com problemas técnicos, ambientais ou econômicos.

Curiosamente, apesar do hiato no arquivamento dos documentos desta empreitada, sempre houve entre os funcionários remanescentes deste período uma reverência a este trabalho, bem como ao projeto de uso do biogás nos automóveis da companhia, datado da mesma época. Presente na memória coletiva, estas demonstrações de arrojo da engenharia brasileira não se perderam. Entretanto o fato de não ter havido publicações sobre o ALL em periódicos científicos conceituados, faz com que uma revisão bibliográfica pautada apenas em documentos desta natureza, não permita o reconhecimento internacional merecido ao pioneirismo deste trabalho.

Outros elementos contribuem para dar a dimensão desta pesquisa na Sabesp, como por exemplo ao se visitar o auditório da Estação de Tratamento de Esgotos de Suzano. Lá ainda é possível encontrar um fluxograma luminoso, o qual indica como destino final para as tortas desta estação, uma fábrica de ALL dentro de seu próprio terreno. Aliás um artigo escrito por Santos (2001), cita um projeto desenvolvido pela empresa Paulo Abib Engenharia S.A. para a execução da FAL - Fábrica de Agregado Leve - na ERQ Suzano em 1981. Este projeto não foi localizado nos arquivos da Sabesp.

Segundo depoimentos informais, a Sabesp só iria administrar o processo de fabricação e comercialização do ALL inicialmente. Na passagem da escala semi-industrial para industrial e com a instalação de outras fábricas, a Sabesp buscaria formas alternativas de parcerias com empresas envolvidas no mercado da construção civil para participar deste novo negócio.

Em 1982, a unidade de ALL foi transformada para produzir fertilizante organo-mineral. “Uma instalação definitiva manteria ambas as linhas de fabricação, com a produção orientada pela qualidade do lodo entrando no processo e pela demanda do produto” (SANTOS, 2001).

Além desta experiência na cidade de São Paulo, houve pesquisa sobre o lodo da cidade de Londrina, através da dissertação de MORALES (1989) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Sua dissertação faz uma caracterização do agregado leve produzido com o lodo de esgoto de Londrina e analisa seu desempenho em concretos, considerando-o aceitável, comparado aos agregados leves convencionais.

3.2.3 Fabricação de Cimento Portland

Um estudo de TAY; SHOW (1991), em escala laboratorial, procurou desenvolver um cimento Portland a partir de tortas de lodo de esgoto. O cimento Portland tem como matérias-primas pedra calcária e argila. Na proposta estudada, a argila foi substituída pelo lodo desidratado. O fluxograma de operações realizadas é mostrado na Figura 3.28. O primeiro passo foi a secagem da torta de lodo, condição necessária para moagem e mistura adequada com a pedra calcária. Esta etapa deve ser sempre considerada em processos de produção ou apenas de incorporação de tortas na indústria de cimento.

Figura 3.28 Fluxograma de operações do estudo de TAY; SHOW (1991) para produção de cimento.

As amostras de lodo desidratado foram secas a 105°C, moídas e misturadas com pó de pedra calcária, CaCO_3 , em diferentes proporções. Estas misturas foram moídas entre 250 e 350 μm , incineradas a temperaturas e tempos de detenção diferentes. O produto final foi moído numa granulometria menor a 80 μm . Os cimentos assim produzidos foram submetidos a análises de suas propriedades, bem como o cimento Portland convencional. A composição das cinzas resultantes da incineração do lodo também foi avaliada.

O melhor cimento produzido foi o resultante da mistura de 50% de lodo seco e 50% de pedra calcária, em massa, com temperatura de queima de 1000°C e tempo de residência no forno de 4 horas. A composição química deste cimento produzido em laboratório é apresentada na Tabela 3.2, bem como a composição da cinza do lodo; também é fornecida a composição do cimento Portland convencional usado como referência, e os valores limites da composição de um cimento Portland comum. Nota-se que a composição química do cimento produzido com lodo de esgoto está dentro das faixas de variação de um cimento convencional, com exceção do CaO , abaixo, e do SO_3 , em excesso. O menor teor de CaO pode afetar a resistência e o excesso de SO_3 pode causar instabilidade no volume, prejudicando a durabilidade do concreto. Ao comparar a cinza com o cimento produzido, observa-se que o teor de CaO vem da adição da pedra calcária.

Tabela 3.2 Composição química em massa percentual (TAY; SHOW, 1991).

Componente	Cimento Portland (%)	Cinza de lodo (%)	Cimento com 50% de lodo (%)	Valores limites* (%)
SiO_2	20,86	20,33	24,55	18-24
CaO	63,30	1,75	52,11	60-69
Al_2O_3	5,67	14,64	6,61	4-8
Fe_2O_3	4,11	20,56	6,26	1-8
K_2O	1,21	1,81	1,05	< 2
MgO	1,04	2,07	2,07	< 5
Na_2O	0,17	0,51	0,17	< 2
SO_3	2,11	7,80	4,88	< 3
Perda ao fogo	1,91	10,45	0,30	< 4

*Cement engineers' handbook (LABAHN, 1983 apud TAY; SHOW, 1991).

Quanto às propriedades do cimento produzido, não foram notados problemas de expansão; o tempo de início de pega foi rápido, o que pode ser atribuído a falta da adição de gipsita, como ocorre nos cimentos convencionais; e a reatividade pozolânica é muito baixa. A resistência à compressão aos 28 dias atingiu 6,28 MPa, cerca de 27% do valor obtido para um cimento Portland comum.

Desta forma este cimento poderia ser usado apenas para fins não estruturais, ressaltando-se que trata-se de uma experiência em escala de laboratório, não contando com os recursos de uma fábrica, e que uma incorporação de 50% é um valor muito alto. Aliás é importante salientar que a produção em escala industrial de cimento Portland é extremamente sensível a composição química de suas matérias-primas, com vistas a correta formulação de suas misturas, as farinhas de cimento. Como o lodo de esgoto sofre variações na sua composição química, a uso deste como matéria-prima para cimento Portland pode ser melhor operacionalizado, ampliando-se a probabilidade de sucesso, através de reduzidos teores de incorporação.

Outra aplicação é o uso de cinzas como pozolanas na substituição parcial do cimento. A reatividade pozolânica é o grau com que um determinado material, que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, reage com a cal livre, hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e água, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O C-S-H é um composto estável com propriedades cimentantes (METHA; MONTEIRO, 1994). O hidróxido de cálcio é liberado pela hidratação do cimento Portland, e as pozolanas podem substituir parte deste aglomerante.

MORALES (1994) confirmou reatividade pozolânica no lodo calcinado entre 750°C e 800°C devido à presença de montmorilonita, tendo concluído ser possível substituir até 35% do consumo de cimento Portland.

Segundo ONAKA (2000) no Japão cerca de 70% das tortas de lodo é incinerada. Parte da cinza e da escória derretida é usada na agricultura e na fabricação de materiais de construção, como agregados leves, escória derretida para base de pavimentação, tijolos e blocos de piso intertravados, mas a maior parte é disposta em aterros. Os problemas são vários: consumo de combustível da incineração, alto custo da fabricação

de materiais de construção a partir das cinzas e da escória, aumento das restrições ao uso agrícola, sazonalidade da agricultura e a falta de áreas para aterros, o que leva a necessidade de buscar outros empregos.

A Figura 3.29 mostra o fluxograma do processo sugerido por ONAKA (2000), que foi testado em 1998 por nove meses consecutivos numa fábrica de cimento. Em suma o processo consiste em secar o lodo, transformando-o em *pellets*, conservando seu teor de matéria orgânica, e consumindo bem menos energia. Estes *pellets*, de 2 a 10 mm de diâmetro, entram no forno junto a matéria-prima do cimento e são queimados juntos. A matéria orgânica é toda utilizada como fonte complementar de calor e a parte inorgânica liga-se ao clínquer produzido. Os traços de metais pesados são fixados em teores ainda mais diluídos na massa do cimento. O monitoramento dos gases e o controle de qualidade do produto não indicaram nenhuma alteração em relação aos valores sem o uso do lodo.

Figura 3.29 Fluxograma de incorporação de pellets na fabricação de cimento ONAKA (2000).

Segundo ONAKA (2000) diante dos bons resultados do teste e considerando uma incorporação de 2% do lodo seco sobre a quantidade de cimento produzida, 90 milhões de toneladas/ano, todo o lodo do Japão – 1,7 milhões de toneladas seca/ano – poderia ser absorvido por este processo, dispensando o alto consumo de energia dos incineradores, reduzindo o consumo de energia nas cimenteiras, reaproveitando a matéria inorgânica e evitando o uso de aterros; portanto significando benefícios ambientais e econômicos.

Uma simplificação desta idéia está em vias de ser estudada em São Paulo. Consta do uso dos pré-calcinadores, existentes em algumas fábricas de cimento, para executar a secagem das tortas de lodo sem transformá-las em péletes. Este material seco então poderia entrar junto com a matéria-prima no forno de cimento, fornecendo calor e incorporando-se no produto final. Entretanto o foco desta pesquisa é a redução de NO_x nas emissões atmosféricas das cimenteiras, porém deverá ser parte inseparável do plano deste trabalho a análise de outros parâmetros nas emissões, como metais e SO_x , além de questões como saúde ocupacional.

3.2.4 Produção de cerâmica vermelha

A informação mais antiga encontrada sobre produção em escala industrial de tijolos utilizando resíduos de tratamento de esgoto refere-se a ETE de Fishwater Flats, Port Elizabeth, na África do Sul. Desde 1979, uma olaria distante 15 km da ETE, produziu mais de 120 milhões de tijolos a partir de uma mistura de 30% de lodo com argila, em volume, para tijolos comuns, e 5 a 8% para tijolos de acabamento (SLIM; WAKEFIELD, 1991 apud WERTHER; OGADA, 1999).

As tortas de lodo misturadas à argila são moídas formando uma massa; esta massa homogênea recebe água tendo sua umidade ajustada em 20%; a massa é extrudada e os tijolos cortados. A etapa seguinte é a secagem em ambiente coberto a temperatura ambiente por duas semanas, ou em estufas por dois dias, numa temperatura entre 60 e 65°C; seguem para a queima, resfriamento e estocagem.

Os tijolos são reconhecidos pela excelente qualidade: cor e textura uniformes; ausência de trincas e são indistinguíveis dos tijolos convencionais em aspecto e odor. Os valores de resistência a compressão para tijolos aparentes e não-aparentes são 40,7 e 38,3 MPa respectivamente, extremamente superiores às normas locais que são 17,0 e 14,0 MPa. A absorção de água em 24 h foi de 13 %, 30% maior que os tijolos fabricados na região, o que agregou vantagem ao produto, pois aumentou sua aderência às argamassas e aumentou os confortos térmico e acústico.

As vantagens relacionadas são a economia de água, a produção de tijolos mais leves, reduzindo o custo de transporte, economia de combustível no forno, além do aproveitamento dos gases da queima em um processo de secagem das tortas de lodo (SLIM; WAKEFIELD, 1991 apud WERTHER; OGADA, 1999).

Outro estudo é o projeto Ecobrick, desenvolvimento na Catalunha, Espanha, em 1993, e atualmente desativado. Tratava-se também da incorporação de tortas de lodo de ETE na argila, em um processo comum de fabricação de tijolos. Os efeitos eram semelhantes aos da experiência de Port Elizabeth. Além disso, foi observado que após a queima acima de 1000°C, os metais pesados são encapsulados na matriz cerâmica, uma vez que a fase líquida, formada nas argilas expostas a altas temperaturas, ataca e integra os óxidos metálicos. Dessa forma os metais fixados na fase vítrea não podem ser lixiviados (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998).

A School of Civil and Structural Engineering, Singapura, trabalha intensamente com o aproveitamento das cinzas provenientes da incineração do lodo de esgoto. TAY (1987) produziu tijolos a partir dessas cinzas misturadas com argila, encontrando resistências a compressão de cerca de 70 MPa para composições com 40% de cinzas, e redução da massa específica em relação ao bloco convencional.

Muitos outros trabalhos de pesquisa de incorporação de lodo desidratado e de cinzas de lodo foram desenvolvidos. A Tabela 3.3 compara algumas propriedades averiguadas nestas pesquisas com proporções diferentes de incorporação.

Há discrepância entre os valores dos estudos selecionados, uma vez que tratam-se de matérias-primas, processos, dimensões dos blocos e normalizações diferentes. Porém, mesmo assim, é possível observar tendências e características da incorporação de lodo em produtos cerâmicos.

O fator limitante no teor de lodo foi a capacidade da mistura ser extrudada. A incorporação de lodo implica em incorporação de matéria orgânica, que ao ser destruída pela queima no

Tabela 3.3 Propriedades dos blocos cerâmicos de diferentes pesquisas de incorporação de lodo.

% resíduo massa	Blocos com incorporação de tortas de lodo									
	Massa específica (g/cm³)		Absorção (%)		Retração de secagem (%)		Retração de queima (%)		Resistência a compressão (MPa)	
	A	B	A	B	A	C	A	C	A	B
0	2,38	2,09	0,03	6,4	4,0	-	9,91	-	87,2	34,6
10	2,32	1,91	0,74	8,6	4,2	-	10,15	-	59,9	25,4
20	2,24	1,76	1,37	13,6	3,7	-	10,84	-	45,9	21,5
30	2,17	1,63	2,58	15,8	4,2	11,1	12,26	3,6	39,5	16,9
40	1,98	-	3,63	-	4,0	-	12,87	-	37,9	-
% resíduo massa	Blocos com incorporação de cinzas de lodo									
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
0	2,38	1,88	0,03	13,25	4,0	3,4	9,91	1,0	87,2	46,2
10	2,42	1,69	0,07	18,80	2,5	2,1	9,95	1,1	85,7	29,2
20	2,46	1,56	0,11	19,37	2,05	1,2	9,10	2,1	80,0	21,5
30	2,50	1,50	1,39	22,54	3,4	0,5	9,36	3,5	70,7	18,5
40	2,55	-	1,52	-	3,2	-	9,79	-	70,5	-
50	2,58	-	1,70	-	3,0	-	10,51	-	69,4	-

Observação 1: Adaptada (TAY; SHOW, 1997)

Observação 2: A – TAY (1987), B – ALLEMAN; BERMAN (1984), C – SLIM; WAKEFIELD (1991) apud TAY; SHOW (1997), D – TRAUNER (1991)

forno, deixa vazios no interior do bloco, os quais levam à redução da massa específica e da resistência mecânica, e ao aumento da absorção e da retração dimensional na queima. A retração na secagem tende a não ser alterada, uma vez que é influenciada pela umidade, e esta por sua vez foi ajustada para a mistura com argila mais seca compensando o teor de umidade da torta de lodo.

Os blocos cerâmicos produzidos com a incorporação de cinzas de lodo tiveram suas propriedades afetadas em função de uma característica peculiar das próprias cinzas. Elas têm a capacidade de reter uma quantidade de água equivalente à sua massa sem, entretanto, desenvolver plasticidade (NORTON, 1970 apud TRAUNER, 1993). Desta forma no processo de secagem, a perda de umidade não se traduz em retração dimensional, uma vez que as cinzas não haviam sido influenciadas pela adição desta mesma água. O aumento da retração

de queima pode ter sido resultado da fusão de alguns compostos das cinzas a temperaturas menores, merecendo estudo mais aprofundado. Este mesmo fenômeno poderia explicar o aumento da absorção, da queda da resistência mecânica e até do ligeiro aumento da massa específica. Ressalva deve ser feita à redução da massa específica no estudo de TRAUNER (1993), atribuída à redução da água quimicamente combinada da argila, bem como à volatilização de alguns de seus compostos.

A qualidade da superfície do bloco feito com cinzas foi superior ao do bloco feito com lodo desidratado (TAY; SHOW, 1997), porém, apesar dos resultados mais favoráveis à incorporação de cinzas, é importante considerar que para obtê-las houve um dispêndio de energia.

No Japão, atualmente existem oito fábricas de blocos usando apenas cinza de lodo de esgoto incinerado, sem nenhum aditivo (OKUNO; TAKAHASHI, 1997). É usada moldagem de alta pressão e queima ajustada entre 1020°C a 1080°C. Estas fábricas fazem parte das ETEs, sendo que uma delas, inaugurada em 1991 produz cerca de 5500 blocos por dia, a partir de 15 m³ de cinza. Passaram a ser competitivos quando com o aumento da temperatura de queima e a adoção de uma camada impermeabilizante solucionaram-se os problemas de crescimento de fungos devido ao teor de umidade e o aparecimento de manchas pela lixiviação do carbonato de cálcio. O processo atende aos três requisitos básicos fixados pelo governo desse país: redução do volume das cinzas; o produto não libera metais por lixiviação e; não é sazonal. O volume do produto final é 20% do volume das cinzas. O único metal pesado detectado nas cinzas é o Arsênio, lixiviado em concentração muito menor que a padrão em pH=3 e também em pH=6, porém no bloco não é detectado em nenhuma destas condições de pH. A fábrica opera oito horas por dia, durante cinco dias por semana, o ano todo.

As fábricas fazem parte das ETEs e pertencem ao Governo Metropolitano de Tóquio, assim parte dos blocos é utilizado para os serviços público da cidade. Quanto a parte comercializada, o bloco tem o preço do bloco concorrente de mercado, cerca de um dólar. O custo de fabricação é de dois dólares, porém esta diferença, segundo o Governo de Tóquio, é muito vantajosa diante dos custos de disposição (OKUNO; YAMADA, 2000). A Figura 3.30 apresenta o atual sistema implantado em Tóquio.

Figura 3.30 Fluxograma do sistema de reciclagem de resíduos de tratamento de esgoto na cidade de Tóquio, Japão (OKUNO; YAMADA, 2000).

3.3 PROBLEMAS NA RECICLAGEM DO LODO DE ESGOTO

3.3.1 Saúde Ocupacional no Manuseio do Lodo

No Brasil, inexistem informações sobre saúde ocupacional dos trabalhadores que tem contato direto com os resíduos de tratamento de esgotos, e em princípio valem as informações relativas aos contaminantes do próprio esgoto, já mencionadas no item 2.5.2. Salienta-se que mesmo tratando-se de lodo digerido, não deve-se perder de vista que, por exemplo, basta um ovo de helminto para ter-se a dose infectante por ingestão ou inalação.

Tomando-se por base os operadores das ETEs, os exames médicos laboratoriais são rotina preventiva contra possíveis contaminações. Quanto a transportadores e agricultores não foram localizados documentos que tratem da incidência de contaminações, e nem publicações orientando seu manuseio direto. Entretanto a preocupação com a contaminação direta de pessoas e animais, tem colocado a incorporação do bio sólido no solo como premissa em todos os projetos brasileiros de norma para uso agrícola, com recomendação de lançamento a profundidades de 10 a 15 cm (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

A agência de proteção ambiental americana faz as seguintes recomendações aos trabalhadores em seu manual, baseadas em princípios de higiene pessoal e treinamento básico (USEPA, 2000):

- lavar muito bem as mãos com água e sabão após qualquer contato com o bio sólido;
- evitar contato do bio sólido com partes sensíveis como rosto, boca, olhos, nariz, órgãos genitais, ou feridas abertas e cortes;
- lavar as mãos antes de comer, beber, fumar, ou de usar o sanitário;
- comer em áreas designadas e sempre longe dos locais de manuseio do bio sólidos;
- não fumar, nem mascar tabaco ou goma enquanto trabalha com o bio sólido;

- usar luvas para proteção contra esfolamentos e/ou contato entre ferimentos e biossólido, ou para evitar a exposição caso ocorram acidentes;
- remover o excesso de biossólido dos sapatos antes de entrar em veículos;
- em caso de feridas ou cortes, mantê-las protegidas com curativos limpos e secos;
- em caso de contato do biossólido com os olhos, lava-los cuidadosamente com água em abundância;
- trocar de uniforme diariamente e, se possível, antes de ir para casa; manter calçado exclusivo para uso nas áreas de estocagem e transporte de biossólido.

Vacinas contra Difteria e Tétano são recomendadas para a população em geral, logo isso inclui todos os trabalhadores em contato com o biossólido. As doses de reforço são recomendadas a cada dez anos. Uma dose contra Tétano deve ser ministrada novamente no caso de um ferimento que foi sujo por biossólidos, caso a última dose de vacina tiver mais que cinco anos. Consultar um médico em caso de exposição direta através de ferida aberta, olhos, nariz, ou boca. É recomendável que trabalhadores em contato com biossólido também sejam vacinados contra a Hepatite A, como uma proteção adicional(USEPA, 2000).

Apesar destas recomendações estarem dirigidas a lodo com destinação agrícola, podem servir como orientações básicas para a incorporação do lodo de esgoto em processos industriais. Em geral as indústrias teriam menor contato direto de pessoas com o lodo, o que reduz ainda mais um risco considerado baixo; e entre elas quanto maior o grau de automação, mais interessante a indústria seria para receber e processar este lodo.

Entretanto a existência de processos de moagem, com emissão de poeira, conforme as condições particulares da instalação, eventualmente poderia introduzir risco de contaminação por inalação. A mesma preocupação deve ser tomada nos processos térmicos no tocante a gases e partículas. De qualquer forma, na medida em que tais processos de incorporação sejam desenvolvidos, uma avaliação de saúde ocupacional poderá ser feita em campo.

3.3.2 Transporte e Armazenamento de Lodo

Dada a inexistência de literatura específica, mais uma vez, os preceitos válidos nos estudos e na prática de uso de bio sólidos na agricultura são expostos nessa dissertação como referência para o item em questão. Entretanto, deve-se observar as diferenças no caso das circunvizinhanças de uma propriedade rural e de uma indústria, por vezes próxima ou até inserida em conglomerados urbanos, e demais particularidades que diferenciam as possíveis destinações do lodo de esgotos. A Tabela 3.4 elenca alguns cuidados para o transporte de bio sólidos.

Tabela 3.4 Cuidados no transporte de bio sólidos (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

Item	Cuidado
Controle do volume de material transportado	Deve ser respeitada a capacidade volumétrica da caçamba, evitando-se carregar quantidades excessivas de lodo, e não permitindo que a carga ultrapasse a estrutura lateral da caçamba.
Limpeza externa e de pneus do veículo de transporte	Na saída da ETE o caminhão ou carreta deverá ter seus pneus e outras estruturas que apresentem deposição de material lavados.
Cobertura da carga	A cobertura da carga com lona não constitui operação indispensável, em se tratando de material com elevado teor de sólidos, mas representa uma operação de baixo custo e que pode evitar situações indesejáveis.
Travas de segurança	Antes de iniciar a operação de carregamento, deve ser verificado se a estrutura de transporte apresenta travas de segurança que impeçam a abertura da caçamba ou das paredes da carreta.
Uso de carreta graneleira, de trator, caminhões graneleiros, ou outra estrutura de transporte	A estrutura deve estar adequadamente adaptada para o transporte do lodo, promovendo a vedação da carreta.
Carregamento e transporte	O carregamento e o transporte não devem ser permitidos em dias de chuva, caso não sejam executados em ambiente e caminhão com cobertura.

O processo de transporte de bio sólidos da ETE até o local de armazenagem pode atrapalhar o trânsito, ser desagradável e emitir odores desagradáveis para a comunidade. Assim ele deve ser gerenciado para minimizar estes problemas, inclusive a exposição pública de odores.

Um dos caminhos pode ser o uso de rotas que evitam passar por áreas residenciais densamente habitadas. Deve-se garantir que os caminhões estejam limpos e não deixem resíduos ao longo das ruas e estradas, o que já reduz em muito a questão de geração de odores. Os caminhões deveriam ser limpos antes de sair das ETEs e depois de descarregar nos locais de armazenagem. Estas atitudes são importantes porque a questão dos odores é acentuada nos congestionamentos, pelos bio sólidos aderidos aos caminhões e às vias de acesso. Estas recomendações, concebidas originalmente para transporte de lodos a serem usados na agricultura, são absoluta e integralmente extensivas a qualquer outro destino para o lodo.

Quando destinado a agricultura, o lodo precisa passar por um período de maturação, para que o processo de higienização se dê por completo, deixando os níveis de organismos patogênicos compatíveis com a legislação. Este tempo varia conforme o tipo de processo de higienização de zero, para secagem térmica, a 30 a 60 dias no caso de calagem (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001). Neste período, o lodo ainda está sob responsabilidade da companhia de saneamento, dentro da ETE, e precisa ser armazenado num pátio adequado, vide Figura 3.31.

Figura 3.31 Estrutura de armazenamento de biossólidos (adaptado de AGRODEVELOPMENT, 1997 apud ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

Este pátio deve ser construído com os seguintes detalhes:

- piso estanque (em concreto armado ou asfalto), visando impedir a infiltração no solo de líquidos derivados do lodo;
- estrutura de coleta do chorume e sua condução à entrada da ETE;
- pé direito projetado com vistas ao fluxo de maquinário;
- cobertura: indispensável a todo pátio de armazenamento, podendo ser com telhas ou lona plástica, desde que impeça o umedecimento com a água da chuva.

A Figura 3.32 é uma alternativa de pátio de estocagem, mais simples porém em conformidade com os itens básicos.

Figura 3.32 Estrutura simplificada de armazenamento (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

Os biossólidos bem estabilizados podem ser estocados sem gerar problemas de mau cheiro (USEPA, 2000). Contudo, o potencial de emissão de odores (compostos de enxofre ou amônia) aumenta, se certas condições ocorrerem durante a estocagem como:

- condições meteorológicas como maior temperatura e umidade;
- pH caindo a menos de 9 em biossólidos estabilizados com cal;
- condições anaeróbias ou deficiência de oxigênio nos biossólidos;
- contato do biossólido com água;
- estocagem prolongada de biossólidos estabilizados inadequadamente;
- métodos de manuseio inadequados;
- limpeza e controle de perdas deficientes.

A agência de proteção ambiental americana em seu manual de estocagem de biossólidos no campo (USEPA,2000) considera possível a armazenagem por até 1 dia em local sem cobertura, porém a preocupação com uma potencial contaminação da água permanece. Para períodos mais longos, até dois anos, são necessárias obras adequadas, como galpões de estocagem, já mencionados. Porém maior tempo de estocagem pode significar perda de nutrientes e geração de odores. Este manual admite para localidades mais áridas, piso de terra bem compactado e até a dispensa de cobertura, vide Figura 3.33. Para áreas propensas a chuvas, o galpão com piso de concreto ou asfalto e a cobertura são indicados, vide Figura 3.34.

Figura 3.33 Estocagem a céu aberto com blocos de concreto como paredes (USEPA, 2000).

Figura 3.34 Galpão de estocagem em Southern Maine (USEPA, 2000).

3.3.3 Processamento térmico de lodos e poluição

O artigo de WERTHER; OGADA (1999) aborda especificamente a combustão dos lodos de esgoto, a partir da comparação com a queima de carvão, processos de incineração de lodo e até alguns casos de incorporação em processos industriais. Algumas informações foram selecionadas e expostas a seguir.

A secagem do lodo, a liberação e combustão de voláteis, a pirólise, e a combustão de grande quantidade de cinzas remanescentes tornam particular o processo de combustão dos lodos de esgotos domésticos.

O alto teor de umidade dos lodos é o principal responsável pelas peculiaridades do seu processo de combustão. Ao contrário do carvão, onde a pirólise começa após o término da secagem, nos lodos a pirólise começa ainda durante a secagem, e a partir daí os dois processos ocorrem em paralelo (WERTHER; OGADA, 1999).

Ao analisar-se os lodos desidratados deve ser considerada a baixa energia líquida liberada durante sua combustão, porque esta energia foi requerida para evaporação da umidade. Se a energia líquida não é suficiente para a auto-combustão, é necessário complementar com combustível (WERTHER; OGADA, 1999).

Outra informação a este respeito é proveniente da fábrica de tijolos em Port Elizabeth, já citada nesta dissertação no item 3.3.3.2. Num forno contínuo, os tijolos moldados por mistura de lodo e argila aquecem, ao atingir uma temperatura de cerca de 150 °C, o lodo começa a pirolizar e a combustão dos voláteis se inicia, o que conduz a um aumento rápido da temperatura dos blocos para 800 °C. No ponto do forno em que o lodo é completamente queimado e o gradiente térmico diminui, um combustível externo é queimado para elevar a temperatura a 960 °C. O uso do lodo nesta fábrica é responsável por uma economia de 55 L de óleo combustível para cada 1000 tijolos (WERTHER; OGADA, 1999).

A pirólise é um processo térmico, onde os compostos orgânicos são desmembrados em espécies mais simples. As reações de pirólise ocorrem na faixa de 350 a 800 °C na ausência de oxigênio. É um dos processos térmicos mais antigos utilizados para a conversão de determinados tipos de combustíveis sólidos (madeira, carvão) em combustíveis gasosos ou líquidos. Ao contrário do processo de combustão, que é altamente exotérmico, o processo de pirólise é altamente endotérmico. Os principais produtos da pirólise de lodo de esgoto são gases, carvão e óleo. Aumentando-se a temperatura de pirólise há um aumento na produção de gases, e redução das quantidades condensadas (óleo) e do carvão (TSUTIYA, 2001).

As análises da composição da fase gasosa mostram que geralmente H_2 , CO, CO_2 e C_xH_y são os principais componentes da pirólise de lodos de esgotos domésticos, sendo que na maioria deles, o CO é a espécie gasosa predominante, porém o C_xH_y também está presente em grande quantidade, vide Tabela 3.5. Outros componentes voláteis são liberados a temperaturas mais baixas. A menos de 500 °C, 70 % do nitrogênio, cerca de 80 % do oxigênio e 90 % do hidrogênio podem ser volatilizados (WERTHER; OGADA, 1999).

Tabela 3.5 Principais componentes gasosos, considerando-se diferentes temperaturas de pirólise para lodos de esgoto domésticos (WERTHER; OGADA, 1999).

Componente	Temperatura [°C]			
	620	670	760	830
	[% em massa dos componentes]			
Hidrogênio	2,50	2,59	3,20	4,62
Dióxido de carbono	24,40	18,32	15,39	7,25
Monóxido de carbono	28,63	34,62	43,43	66,17
Hidrocarbonetos	33,54	36,04	31,12	16,45

É importante notar que os combustíveis voláteis, CO, C_xH_y e H_2 , formam juntos mais de 80% da massa gasosa da pirólise, e grande quantidade do carbono, de 40 a 80 %, é liberada junto com estes voláteis, independente do tipo de lodo ou da umidade. Logo a combustão dos voláteis é dominante no processo de combustão do lodo, e é caracterizada por um consumo muito rápido de oxigênio (WERTHER; OGADA, 1999).

3.3.3.1 Metais pesados e cinzas

As fontes principais de metais pesados nas ETEs são pontualmente as indústrias e de forma mais difusa as residências e as atividades superficiais no solo, como corrosão e erosão, tudo transportado pelo sistema de esgotos. Desta forma, as concentrações de metais pesados no lodo dependem das atividades industriais nas áreas de contribuição dos esgotos para determinada estação. Os metais apresentam-se no lodo sob a forma de hidróxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos. Incorporam-se na matéria sólida do lodo e permanecem com o lodo durante todo o tratamento do esgoto. Em escala de laboratório algumas reduções de metais no lodo são conseguidas através do uso de ácidos, porém em escala real, o único método de redução é a restrição nas fontes, antes de serem descarregados no sistema de coleta (WERTHER; OGADA, 1999).

O alto teor de cinzas no lodo de esgoto pode levar a altas concentrações de material particulado junto com os gases emitidos através da chaminé. Estes gases, dependendo do processo de combustão, projeto do forno e teor de cinzas no lodo, podem conter até 60.000 mg/m³ de material particulado. Este é o caso do incinerador de leito fluidizado, enquanto que para fornos rotativos e de múltiplas câmaras, o teor é de 20 e 10 % deste valor, respectivamente (WERTHER; OGADA, 1999).

Na maioria dos incineradores de resíduos urbanos e de lodos de esgoto, são usados precipitadores eletrostáticos para remoção das cinzas. Eles operam em temperaturas acima de 400 °C, precedidos ou não de ciclones para remoção das partículas mais grossas, inclusive com aproveitamento de calor. Sob as altas temperaturas de combustão nos incineradores, a maioria dos metais pesados é vaporizada, mas depois eles condensam-se na superfície das partículas de cinza, numa parte mais fria do evaporador e são removidos com as cinzas. Cerca de 78 a 98 % do Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn são retidos na cinzas, enquanto que mais de 98% do mercúrio pode ser liberado para atmosfera junto com os gases de saída (WERTHER; OGADA, 1999).

Sendo assim, a técnica de controle de emissão de metais pesados na atmosfera é o emprego de um dispositivo eficiente de captura das cinzas nos gases de saída da chaminé, como

lavadores venturi, precipitadores eletrostáticos, entre outros. Com a limitação na emissão de partículas, o problema de metais pesados é transferido de poluição do ar para a manipulação das cinzas contaminadas. Porém o problema com a lixiviação dos metais pesados pode ser resolvido durante a incineração com o uso de temperaturas mais altas, que levam a fusão das cinzas. Na forma fundida, os metais pesados ficam fortemente encapsulados, tem baixa tendência a lixiviação, e as cinzas podem então ser reutilizadas, por exemplo na construção civil. Mesmo para aqueles fornos que operam a temperaturas mais baixas, a cinza gerada pode ser fundida (WERTHER; OGADA, 1999).

Assim o processamento da cinza de lodo incinerada está tornando-se cada vez mais popular, sendo o Japão o país mais adiantado nesta técnica. As tecnologias consideradas, além da fusão e formação da escória, incluem granulação da cinza, para que sendo queimada em seguida, gere vazios e produza um agregado leve; moldagem da cinza por prensagem e depois queima para produção de blocos de piso intertravado; bem como mistura da cinza com pedra calcária a 1450 °C para produção de cimento (OKUNO; YAMADA, 2000).

Durante o uso do lodo de esgoto na produção de tijolos ou durante a co-combustão na fabricação de cimento, emissões de metais pesados não são um problema. Em produção de tijolos, os metais pesados são encapsulados na matriz do tijolo e não são lixiviáveis, enquanto que durante a produção de cimento os metais pesados do lodo são adsorvidos nas partículas e retornam para o forno depois da separação no precipitador eletrostático (WERTHER; OGADA, 1999).

3.3.3.2 Mercúrio

Devido à baixa temperatura de vaporização dos compostos de mercúrio, eles são prontamente vaporizados. Contudo, face a instabilidade dos compostos de mercúrio gasosos em temperaturas mais altas, geralmente acima de 700 °C os compostos decompõem-se para formar mercúrio elementar. O mercúrio elementar não é prontamente solúvel e depois, diferente dos outros metais pesados, não é removido com as cinzas durante o tratamento dos gases da combustão. Porém mais adiante os gases da chaminé esfriam, e é possível que o mercúrio metálico possa reagir com outros componentes dos gases de saída e formar outros compostos.

Na sua forma iônica, o mercúrio é solúvel e pode ser removido em estágios da lavagem dos gases. O mercúrio reage principalmente com HCl , Cl_2 e O_2 e forma cloretos, enquanto que a reação com SO_2 , NO_x , NH_3 e H_2S é insignificante. Conseqüentemente, o mercúrio elementar ou o cloreto de mercúrio (HgCl_2) são as espécies químicas predominante nos gases que entram no sistema de lavagem. As concentrações de outras espécies de mercúrio (HgO , HgCl , Hg_2Cl_2 e HgSO_4) são baixas nas faixas convencionais de temperatura. Por causa da reatividade seletiva do mercúrio elementar com HCl e Cl_2 , geralmente a porcentagem de espécies elementares em emissões de mercúrio diminui com o aumento do teor de Cl no lodo. No lodo de esgoto, cerca de 30% ou mais do mercúrio das emissões está na forma elementar. Assim a lavagem sózinha pode não ser suficiente para o controle das emissões de mercúrio (WERTHER; OGADA, 1999).

As estratégias para controle das emissões de mercúrio dependem das espécies predominantes. As espécies iônicas, que são predominantemente HgCl_2 , são removidas por lavagem. Os sistemas de lavagem consistem pelo menos de duas fases, uma preliminar e uma principal. Na fase preliminar, o HCl é removido por lavagem com água, enquanto que na fase principal é usado hidróxido de cálcio para remoção do SO_2 e há formação de gesso (WERTHER; OGADA, 1999).

A remoção do mercúrio iônico acontece na fase preliminar da lavagem. A eficiência da remoção depende de três fatores: a solubilidade do composto de mercúrio, a transferência de massa e a recuperação do mercúrio dissolvido. O HgCl_2 tem boa solubilidade em meio ácido, e uma boa taxa de transferência de massa pode ser mantida evitando-se o acúmulo de mercúrio na água de lavagem através de remoção periódica e sua substituição. Depois disso, a água de lavagem carregada de mercúrio é tratada para remover o mercúrio junto com outros metais pesados, por exemplo por coagulação. O outro fator que afeta a eficiência é que alguns componentes dos gases podem reagir com os compostos de mercúrio dissolvido e liberarem mercúrio elementar. Para reduzir este efeito podem ser adicionados aditivos à água de lavagem ou ao gás, os quais reagiriam com os compostos de mercúrio e precipitariam (WERTHER; OGADA, 1999; HYLANDER et al, 2003).

Para ETEs onde a porcentagem de mercúrio elementar é muito alta e a lavagem não é suficiente para limitar as emissões, é necessário um controle adicional, um terceiro estágio: o mercúrio elementar pode ser removido por adsorção em carvão ativado, leito de zeólitas, oxidação de mercúrio metálico com o uso de peróxido de hidrogênio e sua conversão para a forma iônica, que depois pode ser removida por lavagem e filtração (WERTHER; OGADA, 1999). Em um estudo na Suécia, com incinerador de resíduos sólidos municipais - resíduo que contém maior presença de mercúrio - mais de 97% do mercúrio é removido através deste sistema de três estágios: precipitador eletrostático, lavagem de gases e filtro-adsorção (HYLANDER et al, 2003).

3.3.3.3 Dioxinas e furanos

Os termos “dioxinas” e “furanos” referem-se a duas classes de compostos, respectivamente, de 75 dibenzo-p-dioxinas policlorados (PCDDs) e 135 dibenzofuranos policlorados (PCDF), resultantes da variação de 1 a 8 átomos de cloro. O congênere mais tóxico entre eles é o 2,3,7,8 tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD). Outro grupo de agentes químicos, as bifenilas policloradas (PCBs) constituem um grupo de 209 congêneres. Verificou-se que certos PCBs exercem toxicidade semelhante ao TCDD e são conhecidos como PCBs dioxina-símbles. Outros grupos de produtos químicos relacionados que possuem toxicidade dioxina-símbles são as dioxinas bromadas e cloro-bromadas (GREENPEACE, 2002).

As dioxinas e furanos são subprodutos indesejáveis de indústrias químicas, em processos de pirólise e combustão. Outras fontes importantes são os incineradores de resíduos urbanos, resíduos perigosos e hospitalares. Estes compostos são altamente tóxicos mesmo em concentrações muito pequenas, e podem causar doenças de pele e câncer, afetar o crescimento e o desenvolvimento, e também os sistemas nervoso, imunológico e reprodutor (GREENPEACE, 2002). As pesquisas experimentais tem demonstrado que 90% dos PCDD/PCDF são transmitidos ao corpo humano através de produtos de gordura animal e só 10 % pelo sistema respiratório (WERTHER; OGADA, 1999).

Para lodos de esgotos há três possíveis rotas de formação de dioxinas e furanos durante sua incineração. A primeira rota é a formação devido a destruição incompleta de compostos que

contém PCDD/PCDF na câmara de combustão. As dioxinas e furanos também podem ser formados a partir de compostos de cloro, como clorofenol ou clorobenzeno, presentes no forno. A terceira rota é a recomposição de PCDD/PCDF a partir de compostos de cloro inorgânico e compostos orgânicos por nova síntese. Esta última rota acontece com a ajuda de um catalizador, normalmente compostos metálicos nas cinzas volantes, em baixas faixas de temperatura, na caldeira de recuperação de calor e em regiões do precipitador eletrostático, entre 250 e 400 °C. Os compostos metálicos que promovem a formação de PCDD e PCDF incluem cloreto, óxido e sulfato de cobre, como também óxidos de ferro, zinco, níquel e alumínio. O mecanismo de formação é uma reação de catálise através de cloreto metálico (CuCl_2). O Cl_2 formado durante as reações é aquele que clora os compostos orgânicos e conseqüentemente leva a formação de dioxinas e furanos (WERTHER; OGADA, 1999).

Os dois parâmetros que influem na emissão de PCDD/PCDF são o teor de cloro e a relação de enxofre/cloro no lodo. As emissões de PCDD/PCDF aumentam com o aumento do teor de cloro do combustível. Por outro lado, a presença de SO_2 nos gases emitidos inibe a formação de dioxinas e furanos pela remoção do cloro formado nas reações de catálise e indisponibilizando-o para reações com compostos orgânicos para formar dioxinas e furanos. Aumentando a relação S/Cl a concentração de dioxinas e furanos diminui (WERTHER; OGADA, 1999).

No caso do lodo de esgoto, sob as temperaturas de incineração do lodo (acima de 1.200°C), dioxinas e furanos são completamente destruídos, de forma que no incinerador suas concentrações são desprezíveis. Porém na limpeza do gás, onde a temperatura é menor que 450 °C, pode ocorrer uma nova formação de dioxinas e furanos. Felizmente no caso dos lodos de esgoto, este nível de formação é muito menor do que nos incineradores de resíduos urbanos, pois a relação S/Cl é de 7 a 10 vezes maior nos lodos de esgoto. E como já dito, um teor alto de enxofre inibe a formação de dioxinas e furanos. Isto é comprovado por pesquisas em incineradores na Europa e comparações com os respectivos limites legais de emissão, demonstrando que a incineração dos lodos de esgoto não é uma fonte, e sim um redutor de dioxinas e furanos. Os balanços de massa tem mostrado que a partir da quantidade de entrada, mais de 94% é destruído durante a combustão, enquanto que menos de 1% escapa para a

atmosfera com os gases de saída, e cerca de 5% é retido nas cinzas (WERTHER; OGADA, 1999).

Tecnologias modernas implantadas em incineradores de resíduos sólidos urbanos associando precipitador eletrostático, lavador de gases e filtro-adsorção (sistema de três estágios) tem atingido mais de 99% de remoção de dioxinas (EDULJEE; CAINS, 1997; HYLANDER et al, 2003).

Um estudo comparativo entre sistemas de combustão na Inglaterra, mostrou que os teores de dioxinas liberados pelos incineradores de lodo de esgoto são menores que os liberados pelos fornos de cimenteiras. Além disto estes teores são muito menores que aqueles liberados por incineradores de resíduos sólidos municipais, resíduos químicos e hospitalares (ALCOCK et al, 1999).

3.3.3.4 Outros poluentes

Nos velhos incineradores de lodo dos anos sessenta, a remoção de material particulado era o único tratamento dos gases da chaminé pós-combustão. Atualmente tem sido dada maior atenção a remoção dos gases ácidos, como NO, SO₂, HCL e HF, bem como a outros poluentes como, N₂O e CO. Alguns destes gases estão associados aos impactos ambientais globais, como chuva ácida, destruição da camada de ozônio e efeito estufa. As emissões desses gases dependem dos teores de S, N, Cl, entre outros. No lodo de esgoto, o teor de S é semelhante aos dos carvões em geral, e quase sempre o enxofre é liberado como SO₂ durante a combustão. O teor de nitrogênio muitas vezes é bem mais alto que no carvão, o que poderia levar a emissões mais altas de NO_x e N₂O (WERTHER; OGADA, 1999).

Outro aspecto importante é a liberação de uma parte significativa do nitrogênio do lodo durante a pirólise. Numa experiência, na qual partículas de lodo de esgoto foram pirolisadas à 800 °C, foi observado que 56 a 76% do nitrogênio do lodo foi liberado com os voláteis. Outros trabalhos relatam até valores maiores que 90%. Isto era esperado devido ao alto teor de matéria volátil. Também foi notado que o NH₃ é a espécie predominante de nitrogênio liberada durante a pirólise do lodo de esgoto (WERTHER; OGADA, 1999).

3.3.3.5 Considerações sobre uso industrial do lodo e poluição

A maior preocupação durante a combustão do lodo de esgoto é a liberação de poluentes gasosos e sólidos na atmosfera. Se a cinza incinerada for fundida e usada de novo, reduz a possibilidade de lixiviação de metais pesados, bem como demanda menos aterros sanitários, minimizando o risco de contaminação de lençóis freáticos. Isto para altas temperaturas de combustão, acima de 800° C (WERTHER; OGADA, 1999).

As emissões de mercúrio, dioxinas e furanos são atualmente controláveis, e muitos incineradores de lodo de grande porte são capazes de limitar emissões com altos níveis de restrição usando tecnologias atuais (EDULJEE; CAINS, 1997; HYLANDER, 2003). Uma observação interessante é que apesar do alto teor de nitrogênio, a combustão do lodo de esgoto é caracterizada por baixas emissões finais de NO_x , com a taxa de conversão de nitrogênio combustível para NO_x sendo menor que 5%. Tal dado é ratificado em instalações de grande porte (WERTHER; OGADA, 1999).

Diante destas informações, parece que a imagem pública ruim da incineração de lodo de esgoto, pode ser revertida com a concepção de processos de co-processamento, e mostrar-se bastante adequada ambientalmente, desde que tomados todos os cuidados adequados em relação a emissões atmosféricas e temperaturas de operação.

No Brasil não se tem muitos dados sobre incineração, e logicamente muito menos sobre co-processamento de lodo de esgotos. Assim atenção especial é recomendada para os processos de reciclagem do lodo no que tange à emissão de gases num ciclo de queima, os quais podem envolver diferentes temperaturas, e conseqüentemente liberar gases tóxicos em alguma destas temperaturas. Ressaltando-se que apenas a temperatura máxima do processo não é parâmetro suficiente para esta análise.

As características dos resíduos gerados em cada ETE são dependentes das características do esgoto afluente a ETE, o qual não pode ser controlado de forma infalível, a bem da verdade, trata-se de um controle muito difícil, dada a condição pulverizada da sua contribuição.

Não obstante, os produtos químicos adicionados no tratamento também podem conter contaminantes residuais.

Hipotéticas simulações de queima, associadas a temperaturas e tempos de residência nos fornos, tem probabilidade mínima de detecção de gases tóxicos em escala de laboratório, devido a seus baixos valores de concentração.

Diante de tudo isto, o monitoramento de emissões gasosas é uma etapa de extrema importância e deve ser feito em escala real, tão logo seja desenvolvido o processo de reciclagem.

METODOLOGIA DE PESQUISA PARA RECICLAGEM

A pesquisa e o desenvolvimento para reciclagem de um resíduo em um novo produto envolve um conjunto amplo de conhecimentos, de tal forma a gerar uma alternativa técnica e ambientalmente aceitável, socialmente adequada e viável economicamente. A integração destes conhecimentos multidisciplinares, envolvendo informações técnicas, ambientais, legais, sociais, econômicas, propaganda e *marketing* entre outras, é crucial desde a concepção até a produção em escala real. Não se trata de uma soma de etapas estanques, e sim de um inter-relacionamento ao longo de todo o processo.

Para tanto há a necessidade de uma metodologia genérica e de linguagem comum, capaz de propiciar a interação de uma equipe multidisciplinar, otimizando seus resultados. JOHN (2000) propôs uma metodologia, e esta foi adotada nesta dissertação para o estudo dos resíduos de lodo de ETEs. Uma das etapas desta metodologia foi explorada e operacionalizada pelo trabalho de ZORDAN (2003), no qual os resíduos de tratamento de esgotos serviram de objeto num estudo de caso, em conjunto com esta dissertação.

4.1 ESTRUTURA DA METODOLOGIA

A metodologia proposta por JOHN (2000) pode ser dividida nas seguintes etapas:

- a) seleção do resíduo a ser estudado;
- b) levantamento de dados sobre a produção do resíduo;
- c) caracterização detalhada do resíduo;
- d) inventário das alternativas de reciclagem;
- e) seleção da alternativa para pesquisa e desenvolvimento;

- f) desenvolvimento do produto;
- g) avaliação do produto;
- h) estudo da viabilidade econômica;
- i) transferência da tecnologia para o mercado.

Estas etapas são sucintamente expostas a seguir.

4.1.1 Seleção do resíduo a ser estudado

A seleção do resíduo a ser investigado pode ser embasada em critérios como o risco de contaminação ambiental, aspectos sociais como geração de emprego e renda, impacto nas finanças do setor público, grandes quantidades em massa ou volume, facilidade ou oportunidade de reciclagem, custo elevado de disposição, interesse do gerador do resíduo, etc.

Uma vez selecionado o resíduo deve-se partir para um nível de detalhamento dos dados estatísticos deste resíduo, confirmando as quantidades produzidas, identificando eventual sazonalidade na sua geração, além de levantamento de estoque. Também deve ser considerada a possibilidade de mudanças tecnológicas no processo produtivo, o que pode alterar as quantidades e as características do resíduo.

Cabe também salientar que os custos associados à disposição dos resíduos são difíceis de contabilizar, pois vão além das despesas de aterro e transporte, envolvendo pré-tratamento, licenciamento ambiental, eventuais multas por acidentes, e desgaste da imagem da empresa do ponto de vista ambiental.

4.1.2 Processo de geração, tratamento e gestão dos resíduos

O processo que conduz a geração do resíduo deve ser detalhado, e pode fornecer informações fundamentais para a pesquisa do processo de reciclagem. Pode-se partir de bibliografia corrente, porém chegando na especificidade do processo a ser estudado. Também deve ser observada a variação da matéria prima, pois o processo

mantendo estáveis as características do produto final, conseqüentemente terá resíduos absorvendo tal variação na sua composição.

Do processo de geração do resíduo também é possível extrair informações sobre a forma de transporte e estocagem, e estas por sua vez também influem na capacidade de reciclagem deste resíduo.

4.1.3 Caracterização do resíduo

A caracterização do resíduo deve compreender a análise química completa, juntamente com teor de umidade, conteúdo e natureza dos voláteis; a caracterização da microestrutura, fases e porosidade; características físicas como densidade e granulometria; e a classificação ambiental.

4.1.4 Seleção das aplicações a serem desenvolvidas

As aplicações possíveis de um resíduo, em princípio, são aquelas que melhor aproveitam as características físico-químicas deste resíduo. Daí tomar como base a caracterização do resíduo para o levantamento das alternativas de reciclagem ser a diretriz desta metodologia, em detrimento a idéias pré-concebidas.

Nesta etapa fica evidenciada a necessidade de uma equipe multidisciplinar, pois o conjunto de conhecimentos científicos e de mercado é bem amplo, e mesmo para resíduos cujas tecnologias de reciclagem já estejam bem estabelecidas, é desejável buscar novas opções.

A seleção pode ser trabalhada em duas fases, uma seleção de alternativas tecnicamente viáveis, seguida de uma seleção da(s) alternativa(s) para pesquisa e desenvolvimento.

A primeira é uma comparação sistemática das características físicas e químicas do resíduos, ou uma de suas fases, com os requisitos necessários para as diferentes aplicações.

Do resultado desta primeira fase, certamente, é obtida uma gama bem variada de possíveis aplicações, sendo então necessário um refinamento destas, uma nova seleção objetivando a concentração em pesquisas das alternativas mais viáveis em termos de desempenho técnico, impactos ambientais, viabilidade de mercado e aspectos sociais.

Os aspectos ambientais devem ser tratados com foco nos impactos ambientais do berço à sepultura, entretanto neste instante da pesquisa ainda não há disponibilidade de dados suficientes para uma análise de ciclo de vida quantitativa, porém é possível trabalhar em termos semi-quantitativos com a colaboração de especialistas, de modo a escalonar as alternativas em ordem decrescente de impacto ambiental.

Quanto a viabilidade de mercado, mesmo com escassez de dados pode-se distinguir duas linhas principais, a dos aspectos financeiros e da introdução da tecnologia no mercado. As alternativas mais favoráveis residem naquelas que:

- a) minimizem a necessidade de separação, classificação e transformação industrial do resíduo;
- b) minimizem as distâncias de transporte do resíduo até a planta de transformação e da planta até o mercado consumidor;
- c) minimizem o risco de lixiviação ou volatilização de eventuais compostos perigosos presentes, preferencialmente em aplicações onde não tenham contato com seres humanos ou lençol freático;
- d) resultem em produto reciclável;
- e) resulte em um novo produto com vantagem competitiva potencial sobre os existentes no mercado, além do preço.

Neste momento é possível perceber que um grande número de variáveis de naturezas diferentes, mesclando posições qualitativas e quantitativas, fazem parte desta análise para seleção das alternativas a serem encaminhadas à pesquisa e desenvolvimento. Para tratar todas elas é sugerido, então, o uso da análise hierárquica, que trata-se de uma ferramenta baseada na comparação da preferência das diferentes alternativas,

duas a duas, A e B, frente a cada critério de seleção. Havendo dados numéricos, a comparação pode ser expressa em termos numéricos: a alternativa A é x vezes mais importante que a alternativa B. E para dados qualitativos pode-se adotar uma escala, como por exemplo:

A tem mesma importância que B	1
A levemente mais importante que B	3
A mais importante que B	5
A muito mais importante que B	7
A extremamente mais importante que B	9

Uma matriz é construída a partir destas comparações, como mostra a Figura 4.1.

	Alternativa A	Alternativa B	Total da linha	Importância relativa
Alternativa A	1,00	1/2	1,50	0,33
Alternativa B	2,00	1,00	3,00	0,67
Total geral			4,50	1,00

Fig. 4.1 Exemplo de matriz de decisão baseada na metodologia de análise hierárquica (JOHN, 2000).

Convenciona-se comparar linha a coluna. Observar que para a manutenção da consistência, uma nota dada a B em relação a A, nota 2 no exemplo da Figura 4.1, implica em nota inversa de A em relação a B, 1/2. Observar também que a diagonal principal da matriz necessariamente é 1. Calcula-se então os valores totais das linhas, e finalmente os valores relativos das linhas em relação ao total geral. A alternativa que apresentar o maior número de pontos, neste exemplo a alternativa B, é considerada a mais adequada segundo o critério estabelecido.

Comparações envolvendo mais de duas alternativas são mais complexas e devem contar com o auxílio de *softwares* já disponíveis no mercado. Quando o número de variáveis, os critérios estabelecidos, é muito grande, recomenda-se construir uma árvore de decisão, reunindo estas variáveis em grupos relacionados

hierarquicamente. A Figura 4.2 apresenta um esboço de hierarquia para a seleção das alternativas de investigação, na qual os valores ao lado das caixas são os pesos relativos (hipotéticos, neste exemplo) entre as variáveis, estabelecidos pelo processo de comparação duas a duas. Notar que a soma de valores subordinados a uma variável superior sempre totaliza 1.

Figura 4.2 Modelo hipotético de hierarquia para a seleção de alternativas para reciclagem (JOHN, 2000).

Cabe ressaltar que esta ferramenta tem como principal vantagem a possibilidade de integração de muitas variáveis, tanto qualitativas como quantitativas, num único julgamento. Porém é certo que a atribuição da importância de cada critério, a escala adotada, a leitura de cada alternativa mediante cada critério, juntamente com a lucidez de julgamento é que definirão a decisão.

4.1.5 Desenvolvimento do produto

O desenvolvimento do produto reciclado compreende três estágios sequenciais: a pesquisa laboratorial para o desenvolvimento de tecnologia básica, seguido do desenvolvimento da tecnologia aplicada, e finalmente a produção em escala semi-industrial. Este processo de desenvolvimento deve analisar simultaneamente tecnologia, desempenho do produto gerado, aspectos de manutenção, *marketing* e aspectos ambientais do berço à sepultura.

4.1.6 Avaliação do produto

A avaliação do produto deve basear-se em critérios de desempenho, objetivando a adequação ao uso, isto é, às necessidades dos usuários, não apenas usuários finais, mas todos envolvidos com o novo produto. No caso de materiais de construção civil, além do usuário final da edificação, estão envolvidos projetistas e construtores.

Dentre os requisitos de desempenho, a durabilidade tem particular destaque, pois afeta o custo global da solução e o impacto ambiental do sistema. Assim seu objetivo final é estimar a vida útil, definida como o período de tempo durante o qual o produto vai apresentar desempenho satisfatório nas diferentes condições de uso.

Complexo, porém imprescindível, o estudo da durabilidade, por exemplo através de métodos de envelhecimento acelerado, envelhecimento natural e em uso, no caso de produtos contendo resíduos, pode indicar as transformações que este produto irá sofrer ao ser exposto às condições ambientais (clima e micro-clima) e ações de uso, com aumento ou limitação da liberação de contaminantes através de lixiviação.

4.1.7 Análise de desempenho ambiental

Considerando-se que a reciclagem só pode justificar-se quando for a alternativa de gestão do resíduo menos impactante ao meio ambiente, a análise do ciclo de vida é a técnica adequada para tal avaliação, pois acompanha a trajetória completa do produto. Ela consiste num inventário quantitativo e qualitativo de todos os insumos consumidos e dos resíduos sólidos e demais poluentes liberados no ambiente durante todo o ciclo de vida do produto. Tratando-se de reciclagem é necessário executar-se quatro análises, uma do processo que gerou o resíduo sem contar com o processo de reciclagem, outra do processo que gerou o resíduo considerando-se a reciclagem, uma do produto tradicional com o qual o novo produto vai concorrer, e finalmente a análise do ciclo de vida do novo produto.

No conjunto de dados que alimenta análise do ciclo de vida, a lixiviação de espécies químicas é um tema que merece particular atenção. A interação da água com produtos contendo resíduos e os conseqüentes riscos de contaminação, relaciona-se com diferentes variáveis. Os testes buscam simular as condições naturais de exposição. No entanto, diferentes métodos de análise tem dificultado a comparação dos resultados.

4.1.8 Viabilidade econômica

Uma das condições para viabilizar o novo produto no mercado é que seu preço de venda seja competitivo com o concorrente tradicional, ou ser inserido num nicho de mercado onde o produto apresente significativa vantagem competitiva.

Para ser atraente ao gerador do resíduo, a reciclagem precisa reduzir os custos com o resíduo, considerando também eventuais mudanças no tratamento deste resíduo para adequá-lo à reciclagem. Porém podem existir outros atrativos além do financeiro, como a melhoria da imagem da empresa, decisões estratégicas, etc., que pesem na decisão final.

Outra observação é que a análise de viabilidade econômico-financeira é essencialmente local, uma vez que os preços praticados pelo produto tradicional e os custos da disposição em aterro também o são. É possível também que para ter preço concorrente, o gerador do resíduo tenha que remunerar os serviços da empresa recicladora. Uma forma mais sofisticada também pode ser a formação de uma sociedade entre a empresa geradora do resíduo no empreendimento de reciclagem.

Em suma, a atratividade da reciclagem, enquanto negócio, será garantida se propiciar rentabilidade superior às alternativas existentes, considerando-se o período de tempo necessário para o retorno do capital investido a diferentes taxas.

4.1.9 Transferência da tecnologia

A efetiva concretização da reciclagem ocorre quando o produto entra em escala comercial, o que faz da transferência de tecnologia etapa essencial do processo, e na qual preço é importante, porém não é o suficiente.

A excelência técnica, o preço, as vantagens ambientais, um grande número de pesquisas sérias confirmando a viabilidade da reciclagem de um dado resíduo, por si só não bastam para garantir o sucesso do empreendimento. Desde o início da pesquisa há extrema dependência da colaboração entre geradores do resíduo, potenciais consumidores do resíduo, agências governamentais de gestão ambiental e instituições de pesquisa participantes. Um esforço conjunto deve convencer os consumidores finais, que o novo produto apresenta vantagens competitivas e baixos riscos técnicos e ambientais. O estigma de produto de *segunda mão*, ou de menor qualidade, deve ser suplantado pela exploração do lado *ecológico* da reciclagem.

Neste sentido, a divulgação através de instituições de pesquisa, com reputação de excelência no mercado, certamente contribui para a aceitação do produto. O Estado, por sua vez, pode utilizar seu poder de compra para vencer a resistência inicial do mercado.

Tudo isto deve ser planejado anteriormente, dada sua importância no sucesso do empreendimento de reciclagem, bem como por significar custos a serem relacionados.

4.2 PLANO DO TRABALHO

Nesta dissertação a metodologia proposta por JOHN (2000) foi adotada até a etapa da seleção de alternativas para pesquisa e desenvolvimento, conforme o objetivo estabelecido, citado no Capítulo 1. O plano de trabalho é descrito abaixo.

1ª Etapa, escopo do Capítulo 5.

A seleção do resíduo a ser estudado e o levantamento dos dados sobre a produção de resíduos foram executadas a partir de informações obtidas na Sabesp, através de visitas às Estações de Tratamento de Esgotos, entrevistas com responsáveis por este assunto na empresa, e consulta a documentos internos como relatórios operacionais e ao Plano Diretor de Uso/Disposição dos Lodos de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo.

2ª Etapa, escopo do Capítulo 6.

A caracterização do resíduo foi extraída de relatórios disponibilizados pela Sabesp, tanto de laboratórios próprios de cada ETE, como de institutos de pesquisa, e de laboratórios particulares. Algumas análises foram feitas na Escola Politécnica da USP.

3ª Etapa, escopo do Capítulo 7.

A seleção das alternativas para pesquisa e desenvolvimento foi realizada em parceria com ZORDAN (2003). Sua tese propõe uma metodologia para operacionalizar a proposta de JOHN (2000) na seleção das alternativas de reciclagem para pesquisa e desenvolvimento.

Os resíduos de ETEs foram, assim, simultaneamente objeto de estudo de caso da tese de ZORDAN (2003), e objeto de investigação para seleção de alternativas para continuidade em pesquisa e desenvolvimento num processo de reciclagem nesta dissertação.

As diretrizes do trabalho de ZORDAN (2003), que foram aplicadas nesta 3ª Etapa do Plano de Trabalho, são apresentadas a seguir:

- 1) Elaboração de um relatório das características do resíduo, DOSSIÊ, a partir da caracterização apresentada no Capítulo 6 desta dissertação.
- 2) Realização de entrevistas com pessoas de notório saber em diferentes áreas da Engenharia, produtores de materiais de construção, reciclagem de resíduos, etc. – ESPECIALISTAS – buscando dados quanto ao interesse do resíduo e viabilidade técnica. Com uma ou mais propostas de uso do resíduo, a entrevista seguia para um esboço de especificação do sistema de reciclagem necessário para aquele uso, sob os pontos de vista de quatro conjuntos – econômico, ambiental, ocupacional e de mercado. Trata-se de um esboço, uma vez que maior detalhamento destes temas só poderia ser obtidos durante o próprio processo de pesquisa e desenvolvimento.

Durante as entrevistas, os especialistas desconheciam a identidade do resíduo, em nome da isenção de preconceitos, apenas tendo acesso ao DOSSIÊ. As entrevistas foram conduzidas com FORMULÁRIOS que apesar da liberdade de respostas, disciplinavam a geração de resultados numéricos, mesmo a partir de informações qualitativas. Ao término da entrevista a origem do resíduo era revelada.

- 3) Avaliação dos sistemas de reciclagem propostos nas entrevistas. Esta avaliação foi feita para cada um dos quatro conjuntos, acima relacionados, usando os dados levantados com os ESPECIALISTAS, e mediante um tratamento de ponderação em diferentes graus de importância, gerando uma hierarquia entre as alternativas técnicas sugeridas nas entrevistas.

O estabelecimento das escalas para ponderação dos itens componentes de cada um dos quatro conjuntos foi desenvolvido no trabalho de ZORDAN (2003), que listou as variáveis de cada conjunto, entrevistou profissionais das respectivas áreas e gerou parâmetros e escalas genéricas para auxiliar tais análises.

A especificidade do estudo para os resíduos de tratamento de esgotos foi obtida pela interação entre as informações levantadas com os ESPECIALISTAS e estes parâmetros e escalas.

- 4) Seleção das alternativas sustentáveis, ordenando os conjuntos analisados (técnico, econômico, ambiental, saúde ocupacional, e mercado). Proposta de uma árvore de decisão, através de um critério de hierarquização, que indique, em ordem decrescente de viabilidade, as alternativas mais adequadas para prosseguimento num processo de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem. É conveniente esclarecer aqui que a definição da árvore de decisão, o que inclui o estabelecimento de prioridades a serem ponderadas entre os conjuntos de análise, não é pragmática, e sim resultante do julgamento dos atores envolvidos no problema, face a seus interesses, e é passível de adequação conforme as condições temporais e circunstanciais.

No entanto, isto não invalida os resultados desta dissertação do ponto de vista das informações e sistematização metodológica para o estabelecimento das alternativas sustentáveis. Simplesmente a metodologia permite que a própria Sabesp, ou o Governo do Estado, ou a sociedade definam os graus de importância de cada grupo de tópicos, adotando nesta última fase a hierarquia que melhor representar seus interesses dentro de um elenco de alternativas sustentáveis.

Os parâmetros adotados por ZORDAN (2003) são expostos na medida em que forem sendo utilizados no Capítulo 7, de modo a facilitar a leitura, tornando-a sequencial.

CAPÍTULO 5

GESTÃO DOS RESÍDUOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA RMSP

A primeira etapa da metodologia deste trabalho é o conhecimento do processo gerador dos resíduos. Trata-se de uma descrição sucinta e simplificada das ETEs da RMSP, cujo foco é a reciclagem dos resíduos destas estações, objetivando o reconhecimento das principais características da geração dos resíduos e a seleção do resíduo que se pretende tratar, identificando pontos favoráveis e desfavoráveis para o aproveitamento deste.

A partir de relatórios operacionais, algumas informações foram levantadas, entre elas estão as origens do resíduo, os pontos de geração, as quantidades produzidas, regularidade do processo, uniformidade ou não entre as diferentes estações, etc.

5.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DA RMSP

O esgotamento sanitário da RMSP é dividido em duas grandes partes: o Sistema Principal e os Sistemas Isolados. O Sistema Principal atende à área central e densamente urbanizada, englobando as bacias drenantes dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí e algumas sub-bacias dos reservatórios Guarapiranga e Billings. Os Sistemas Isolados atendem às regiões periféricas e com menor grau de urbanização.

O Sistema Principal de Esgotos da RMSP é constituído por cinco sistemas integrados de tratamento com estações de mesmo nome: ETE ABC (ABC), ETE Barueri (BAR), ETE Parque Novo Mundo (PNM), ETE São Miguel (SMG) e ETE Suzano (SUZ), conforme disposto no mapa da Figura 5.1. Este sistema tem atualmente capacidade nominal de tratamento para $18 \text{ m}^3/\text{s}$ de esgoto bruto e atualmente está operando com $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Estas estações apresentam características próprias na concepção das suas unidades constituintes. A Tabela 5.1 apresenta tais diferenças e as Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os fluxogramas de cada uma delas. Todas as estações são dotadas de tratamento de fase sólida com o uso de filtros-prensa, portanto todas geram tortas de lodo.

A diferença mais significativa está no condicionamento químico dos lodos. Nas ETEs Barueri e São Miguel, ele é feito com polímeros e nas demais com cal e cloreto férrico. Também é necessário destacar que a ETE Parque Novo Mundo é a única das cinco que não possui os processos de decantação primária e de digestão dos lodos, implicando suas substituições respectivamente por peneiras rotativas e estabilização química.

Atualmente a ETE São Miguel é a única que possui secador térmico. Entretanto a torta de lodo processada neste secador é provisoriamente gerada na ETE Barueri, solução diferente da prevista no plano original, servindo apenas para por em operação este secador. As tortas de lodo das ETEs São Miguel, Parque Novo Mundo e Suzano, que deveriam ir para este secador, têm apresentado dificuldades na formação dos péletes.

Nas especificações do equipamento, as tortas de lodo devem ser condicionadas com polímeros e não com cal, logo os lodos da ETE SUZ e da ETE PNM não são adequados. Já o lodo da própria ETE SMG, devido à grande contribuição de efluentes industriais, tem ocasionado problemas não só na formação dos péletes, como também nas emissões atmosféricas. Estes problemas estão sendo analisados pelas áreas responsáveis pela implantação e operação do secador.

No escopo do Projeto Tietê, o objetivo deste secador era a redução dos volumes de tortas a serem dispostos em aterro, através de retirada da água das tortas, numa temperatura aproximada de 100° C e conformando o resíduo em grânulos, os péletes.

Tabela 5.1 Sinopse das unidades de cada estação da RMSP.

		ETEs				
		ABC	Barueri	Parque Novo Mundo	São Miguel Paulista	Suzano
Fase Líquida	Grades grosseiras	●	●	●	●	●
	Grades médias	●	●	●	●	●
	Peneiras rotativas			●		
	Caixas de areia	●	●	●	●	●
	Decantadores primários	●	●		●	●
	Tanques de aeração	●	●	●	●	●
	Decantadores secundários	●	●	●	●	●
Fase Sólida	Adensadores por gravidade	●	●			●
	Adensadores por flotação	●	●	●		
	Grade fina					●
	Digestores	●	●		●	●
	Estabilização química			●		
	Condicionamento químico	●	●	●	●	●
	Filtro-prensa	●	●	●	●	●
Fase Gasosa	Gasômetro	●	●			
	Queimadores	●	●			●

Fonte: SABESP (2002), adaptada.

Figura 5.2 Fluxograma de processo da ETE ABC.
Fonte: SABESP (2002).

Figura 5.3 Fluxograma de processo da ETE Barueri.
Fonte: SABESP (2002).

Figura 5.4 Fluxograma de processo da ETE Parque Novo Mundo.
Fonte: SABESP (2002).

Figura 5.5 Fluxograma de processo da ETE São Miguel.
Fonte: SABESP (2002).

Figura 5.6 Fluxograma de processo da ETE Suzano.
Fonte: SABESP (2002).

5.1.1 Operações e processos das ETEs da RMSP

Através de um amplo sistema de tubulações subterrâneas de captação e encaminhamento, que inclui redes coletoras, coletores-tronco, interceptores e emissários, os esgotos chegam às estações de tratamento. Descreve-se a seguir as operações e processos de tratamento de esgotos nas ETEs da Região Metropolitana de São Paulo, as quais operam pelo processo de lodos ativados convencional. Esta apresentação foi dividida em três fases: líquida, sólida, e gasosa, pois, uma vez que o sistema foi projetado para remover 80% de DBO e 80% de sólidos em suspensão, há um fluxo de matéria líquida a ser encaminhado para um curso d'água, outro fluxo de matéria sólida, resíduo do tratamento da fase líquida, e geração de gases resultante das reações sofridas pela matéria orgânica nos digestores (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998).

FASE LÍQUIDA

a) Gradeamento.

Assim que entra na estação, o esgoto passa por dispositivos constituídos de barras metálicas paralelas com espaçamento de 100 mm (grades grosseiras) e depois de 25 mm (grades médias). Nestes dispositivos ficam retidos sólidos grosseiros em suspensão e corpos flutuantes tais como papéis, trapos, pedaços de madeira, latas, materiais plásticos, etc, evitando obstruções nas unidades de tratamento subseqüentes. Este material é recolhido e depositado em caçambas para posterior disposição em aterro sanitário. Observa-se aqui o primeiro ponto gerador de resíduo na ETE, o material gradeado.

b) Desarenação.

É executada através de caixas de retenção de areia e outros detritos minerais e pesados, tais como entulhos, seixos, partículas metálicas, carvão, etc. O mecanismo de retenção é a sedimentação. Uma vez que estas partículas mais densas que a água são conduzidas em suspensão ou por arraste pelo fundo das canalizações em decorrência da turbulência da corrente líquida, uma redução na velocidade de escoamento leva à sedimentação destas partículas, obtida com a construção de caixas com dimensões adequadas. Entretanto, face as características do esgoto e grandes vazões a serem tratadas, este mecanismo pode ser aperfeiçoado, assim estas caixas podem ser aeradas, isto é, ao longo de um dos lados é injetado ar difuso conferindo ao efluente um movimento helicoidal, evitando a deposição de matéria orgânica. Observa-se aqui o segundo ponto gerador de resíduo na ETE, a areia removida.

c) Decantação Primária.

Visa a remoção de sólidos sedimentáveis antes de qualquer tratamento biológico (lodo primário) bem como do material flutuante (escumas, óleo, gorduras). O material removido segue para adensadores de lodo por gravidade. Quando há falta de

espaço físico a decantação primária pode ser substituída por Peneiramento Rotativo de abertura 0,76 mm, retendo-se materiais mais finos e equivalentes a uma redução aproximada de 10% de DBO e 15% de SS, como ocorre na ETE Parque Novo Mundo.

d) Tanques de Aeração.

Sendo o sistema do tipo lodos ativados, há tanques de aeração, por ar comprimido, funcionando em regime de mistura que tende ao tubular, porém o melhor seria o regime de mistura completa. Esse processo apresenta grande capacidade de absorção das cargas de choque que afluem à ETE frequentemente em áreas onde existem quantidades significativas de efluentes industriais, como no caso da região do ABC.

e) Decantação Secundária.

O efluente dos tanques de aeração é encaminhado, através de canais aerados, para decantadores circulares. Parte do lodo sedimentado é recirculado para os tanques de aeração. O excesso de lodo secundário, juntamente com a espuma e materiais flutuantes segue para os flotadores, para adensamento anterior à digestão.

FASE SÓLIDA

a) Adensamento de Lodo por Gravidade.

O lodo dos decantadores primários, que possui um teor de sólidos menor de que 1%, é adensado por gravidade até cerca de 3% de teor de sólidos, através da remoção da água livre, a qual retorna ao início do processo. Este lodo é então enviado aos digestores anaeróbios.

b) Adensamento de Lodo por Flotação.

O excesso de lodo ativado, proveniente dos decantadores secundários, vai para os flotadores onde é adensado até 4% através da injeção de uma emulsão ar/água pressurizada, que diante da despressurização nos tanques de flotação, carrega as partículas de lodo para a superfície, de onde são removidas e enviadas para os digestores anaeróbios.

c) Digestão.

O lodo proveniente dos adensamentos por gravidade e por flotação são encaminhados para digestores anaeróbios, onde ocorrem a estabilização do lodo, o adensamento e a remoção do sobrenadante líquido. A estabilização do lodo também pode ser efetuada sem o processo de digestão, através da adição de cal, chamada estabilização química, como ocorre na ETE Parque Novo Mundo.

d) Condicionamento Químico dos Lodos.

Os lodos digeridos, com teor de sólidos de cerca de 3,5%, recebem um condicionamento, com a finalidade de melhorar suas condições de desidratação. Esse processo consiste na adição de cal e cloreto férrico, o que ocorre nas ETEs Parque Novo Mundo, Suzano e ABC. Na ETE São Miguel, o condicionador usado é o polímero, e na ETE Barueri, polímero e cloreto férrico.

e) Desidratação Mecânica.

Efetuada por filtros-prensa, onde o lodo condicionado é injetado entre placas, transformando-o em uma “torta de lodo”, cujo teor de sólidos atinge cerca de 40%. Após a desidratação mecânica, os lodos são transportados para disposição em aterro sanitário.

f) Secagem Térmica.

Na ETE São Miguel, uma outra etapa é acrescentada antes da disposição das tortas em aterro, a secagem térmica com gás natural e parte do biogás produzido nos digestores da ETE. As temperaturas são baixas e a matéria orgânica do lodo não é utilizada como fonte de energia no processo. O produto final é um lodo peletizado, com teor de sólidos de cerca de 90% e com granulometria de 3 a 4 mm. Dependendo da sua qualidade, esse produto pode ser utilizado como condicionador de solo ou como base para fabricação de fertilizante organo-mineral, entre outras. Apresentando condições impróprias para a utilização na agricultura, é depositado em aterro sanitário. Atualmente tem sido encaminhado para o aterro.

FASE GASOSA

Da decomposição da matéria orgânica nos digestores resultam produtos gasosos típicos de processos anaeróbios como CH_4 , CO_2 e N_2 , quantidades menores de H_2 e H_2S também ocorrem. Este gás de esgoto, chamado de biogás, é constituído principalmente por metano. Tem poder calorífico variado, em torno de 5 a 6,5 kcal/m^3 , dependendo do teor de metano. Este valor equivale a 60% do poder calorífico do gás natural, o que o torna potencialmente aproveitável.

Dentro da ETE, esse gás poderia ser utilizado para o aquecimento dos digestores, além da secagem de lodos. Outras utilidades poderiam ser a produção de energia em motores fixos, incineração de resíduos, acionamento de veículos ou geração de energia elétrica, entre outras (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998). Isto já acontece em algumas ETEs, porém atualmente, o biogás produzido nas ETEs da RMSP é predominantemente encaminhado para queimadores, implicando desperdício de energia e prejuízo ao ambiente, uma vez que CH_4 e CO_2 são gases do efeito estufa. Além do mais um dos maiores custos dessas ETEs é com o consumo de energia elétrica.

a) Gasômetro.

Dada a variação de produção do gás, um processo de reservação é necessário para equilibrar a pressão nos pontos de consumo, que atualmente são os queimadores.

b) Queimadores.

Através de um sistema composto por tubulações, válvulas de alívio, corta chamas e medidores de gás, o biogás é encaminhado para dispositivos de queima que funcionam automaticamente através de uma chama piloto permanentemente alimentada por tubulação própria dando início à queima quando o gás se apresentar sob pressão pré-estabelecida.

5.1.2 Quantidades atuais e perspectivas de tratamento de esgotos

A cidade de São Paulo lança grande parte de seus esgotos domésticos no rio Tietê. Com o intuito de despoluir este rio, o qual atravessa a cidade, foi criado o Projeto Tietê. Tal projeto inclui ampla construção de redes coletoras, coletores-tronco e interceptores para captação e encaminhamento dos esgotos às estações de tratamento. A medida que estas obras vão sendo concluídas, as vazões de esgotos a serem tratadas aumentam, e conseqüentemente a produção de lodo de esgoto também.

A Tabela 5.2 apresenta primeiramente dados reais das vazões de tratamento de esgotos entre julho de 2001 e junho de 2002 de cada ETE, e o total do sistema. Em seguida apresenta as previsões calculadas pelo consórcio responsável pela elaboração do Plano Diretor de uso/disposição dos lodos das ETEs da RMSP. Observando a previsão para o ano de 2002 e contrapondo-a com a realidade nota-se de forma geral que houve uma discrepância média três vezes maior na previsão. Pode-se atribuir a isto à não conclusão das obras de interligação que levariam o esgoto para estas estações. Estas oscilações nas vazões de esgoto bruto, até devido a operações internas, adaptações e manutenção implica também em instabilidade da operação de

desidratação da fase sólida. Desta forma estas previsões não estão invalidadas para prazos maiores.

Tabela 5.2 Comparação das vazões tratadas de esgotos (2002) e perspectivas.

ETE	Vazões (m ³ /s)					
	Capacidade Nominal Atual	2002*	2002**	2005**	2010**	2015**
ABC	3,0	1,41***	4,27	5,65	7,99	8,26
Barueri	9,5	6,47	15,13	17,64	22,92	24,27
PNM	2,5	1,32	4,59	5,84	8,04	8,49
SMG	1,5	0,59	2,87	4,43	5,98	6,50
Suzano	1,5	0,71	1,10	1,55	2,28	2,28
Total	18,0	10,50	27,97	35,11	47,22	49,80

* Média dos valores reais de vazões tratadas de esgoto (jul/01 a jun/02).

** Valores da previsão do Plano Diretor (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998).

*** Na ETE ABC a vazão de esgotos afluentes é apenas 150 L/s. O restante da vazão de operação é proveniente do Rio Tamanduateí e do Córrego dos Meninos, sendo ambos praticamente constituídos de esgotos na época da estiagem. Porém, devido a diluição e agregação de sedimentos os dados operacionais diferem das previsões de projeto e dos valores usualmente apresentados por ETEs desse tipo (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998).

5.2 TAXAS DE GERAÇÃO E PRÁTICAS DE GESTÃO DOS RESÍDUOS

5.2.1 Panorama Internacional

Internacionalmente, as principais formas de disposição de lodos de ETEs são três: aterros, uso agrícola e incineração, como pode ser visto nos dados da Tabela 5.3 sobre Europa e EUA.

Tabela 5.3 Produção e disposição de tortas de esgoto na Europa e EUA.

Formas de disposição	Europa	EUA
Total produzido de tortas	16 milhões t/ano	13 milhões t/ano
Aterros	40%	42%
Uso agrícola	37%	22%
Incineração	11%	16%
Demais usos benéficos	2%	5%
Disposição oceânica	6%	6%
Outras formas	4%	9%

Fonte: Adaptado do Plano Diretor (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998).

A disposição em aterro pode ser de duas formas básicas: a co-disposição com resíduos sólidos urbanos e a disposição exclusiva, a qual prolonga a vida útil do aterro sanitário. O uso benéfico dos lodos na agricultura pode ser feito através da secagem térmica prévia dos lodos, ou na forma de tortas, após a compostagem, ou mesmo na forma líquida em que são obtidos originalmente nas ETEs. A incineração é praticada em fornos incineradores, sendo melhores os de tecnologia de leito fluidizado. A disposição oceânica vem sendo paulatinamente substituída pelo uso agrícola. Os demais usos benéficos citados compreendem o uso dos lodos para recuperação de áreas degradadas e reflorestamentos; e no caso do Japão, produção de materiais de construção. Outras metodologias são empregadas em pequena escala, sem comprovação de validade em escala maior, assim consideradas tecnologias emergentes, tais como o desenvolvimento da fabricação de produtos cerâmicos e agregados leves para uso na construção civil.

5.2.2 Alternativas do Plano Diretor

Atendendo a solicitação da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp – solicitou ao consórcio ETEP, Estática e JNS, o desenvolvimento de um Plano Diretor de Uso/Disposição de Lodos da RMSP (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998). As informações contidas neste plano delinearão o cenário do problema, posturas internacionais, tecnologias e uma estrutura para solução do problema. Tecnologias para o aproveitamento das propriedades do lodo foram direcionadas apenas para a agricultura, enquanto que alternativas de reciclagem na área industrial como na fabricação de materiais de construção, não foram contempladas no plano. Dada a falta de informações, estas foram classificadas como tecnologias emergentes e portanto dependentes de mais estudos.

Conforme este plano, para atender as vazões de esgoto previstas pelo Projeto Tietê, a Sabesp optou por duas alternativas de disposição dos lodos: o aterro sanitário exclusivo e o uso agrícola. A solução baseia-se na tecnologia de secagem térmica de percentual significativo das tortas, que numa primeira etapa apenas objetiva

minimizar os volumes a serem dispostos no aterro, pois apesar da manutenção da matéria orgânica, os lodos da RMSP apresentam teores de metais pesados acima dos permitidos para o uso agrícola. Nos aterros então, será depositado grande percentual de lodo na forma de péletes (2 a 4 mm) estabilizados, mas também sob a forma de tortas, as quais receberão uma adição de cal virgem para assegurar os padrões técnicos e ambientais de lançamento.

O uso agrícola, bem como qualquer outro uso benéfico dos lodos, depende de um maior controle dos lançamentos de origem industrial e da aceitação do biosólido no mercado. Porém cabe lembrar que este controle é um aspecto difícil de executar, fiscalizar e principalmente de garantir. Enquanto houver a possibilidade de cargas de poluentes perigosos, provenientes de despejos industriais inadequados, serem lançadas em conjunto com os esgotos domésticos, fator inerente a regiões onde o planejamento e a ocupação do solo ocorreram de forma desordenada como a RMSP, haverá risco dos teores limites destes poluentes serem superados.

Outros fatores como sazonalidade na agricultura e recentes alterações na legislação ambiental para o usuário do biosólido, também fragilizam a exclusividade desta alternativa para a RMSP. Por exemplo, o Decreto nº 47.397-02 de 04 de dezembro de 2002 (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2002), estabelece a necessidade de licenciamento do empreendimento agrícola que usa o biosólido.

Assim o aterro exclusivo passa a ser a peça fundamental da solução deste plano, que inclui: 5 ETEs (Suzano, Barueri, São Miguel, Parque Novo Mundo e ABC), 2 centrais de secagem térmica – CST – implantadas nas ETEs Barueri e São Miguel e 7 aterros localizados a até 50 km das ETEs produtoras de lodo. A previsão dos volumes requeridos para aterro até 2007 é de 4 milhões de m³ sem a secagem térmica e de 2,5 milhões com seu auxílio. Apenas no caso de saturação do sistema se recorrerá a incineração.

5.2.3 Situação atual na RMSP

Os resíduos produzidos nas ETEs são levados a aterros sanitários da Prefeitura Municipal de São Paulo para co-disposição com os resíduos sólidos urbanos da cidade, através de um convênio pelo qual a Sabesp trata o chorume destes aterros em troca da disposição dos resíduos de tratamento de esgotos nos aterros da prefeitura.

Assim o material gradeado, o peneirado, a areia removida, os lodos na forma de tortas e de péletes são transportados por caminhões até o aterro Bandeirantes, no caso da ETE Barueri, e até o aterro São João, no caso das demais ETEs do sistema principal. Entretanto, com o avanço do projeto de despoluição do rio Tietê, tem-se um contínuo crescimento da demanda de esgoto a tratar e conseqüentemente um aumento da produção de resíduos, enquanto os aterros estão prestes a encerrar sua vida útil.

As cinco ETEs da RMSP estão em funcionamento e geram relatórios mensais com informações como caracterização do esgoto bruto e do efluente final, cargas removidas, material removido, geração de subprodutos, consumo de produtos químicos, entre outros. Foram tomados os relatórios relativos ao período de julho de 2001 a junho de 2002 (SABESP, 2002), e algumas informações foram selecionadas, e apresentadas na Tabela 5.4. A escolha destas informações baseou-se na necessidade de dados para seleção do resíduo a ser analisado.

Tabela 5.4 Dados operacionais do Sistema de Esgotos da RMSP.

ETE	Vazão (m ³ /s)	Material Removido			Consumo de Produtos Químicos			Geração de Subprodutos	
		Gradeado (kg/dia)	Areia (kg/dia)	Peneirado (kg/dia)	CaO (kg/dia)	FeCl ₃ (kg/dia)	Polímero (kg/dia)	Lodo (t/dia)	Gás (m ³ /dia)
ABC	1,41	338	334	-	1.171	937	-	17	1.549
BAR	6,47	1.020	1.261	-	-	3.503	295	226	23.557
PNM	1,32	27	988	1.377	5.192	2.101	-	36	-
SMG	0,59	226	1.430	-	-	-	4	8	-
SUZ	0,71	170	3.211	-	2.254	1.109	-	40	3.045
Total	10,50	1.781	7.224	1.377	8.617	7.650	299	327	28.151

Observação 1: Esses valores são médias anuais dos respectivos valores médios mensais de jul/01 a jun/02.

Observação 2: A medida do lodo é dada em base úmida com cerca de 40% de sólidos.

Fonte: SABESP (2002), adaptada.

A primeira observação é a preponderância das quantidades de tortas de lodo comparada à geração de material gradeado, areia e peneirado. Isto leva a selecionar as tortas de lodo como o resíduo a ser estudado, porém isto não implica desconsiderar os demais. São 327 toneladas de lodo – com teor de sólidos de 40% – geradas por dia para uma vazão de 10,50 m³/s atualmente. Considerando-se as previsões de tratamento de esgotos para 2015, apresentadas no item 5.1.2, a produção de tortas de lodo será de 1.551 t/dia.

Tomando por base o Plano Diretor (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998), os custos de transporte e disposição destes resíduos são da ordem de R\$ 70,00 por tonelada, porém em aterros particulares este valor pode ultrapassar R\$ 200,00 por tonelada considerando tratar-se de Resíduo Classe II¹. Na Figura 5.7 são representadas as distâncias rodoviárias médias entre as ETEs e suas taxas de geração de tortas de lodo.

É importante esclarecer que apesar das cinco ETEs estarem em funcionamento, estáveis quanto a fase líquida, pode-se dizer que ainda não apresentam um regime regular de operação na fase sólida, uma vez que suas vazões de tratamento estão em crescimento, e a adequação de seus equipamentos e subsistemas ainda está sendo feita. Logo, os dados e discussão apresentados a seguir retratam um momento de aprimoramento das ETEs quanto a fase sólida, mais diretamente a desidratação.

Além disso, as quantificações dos resíduos gerados ainda são executadas de forma não muito criteriosa. Este fato faz com que esses dados representem ordens de grandeza para compreensão dos processos de geração dos resíduos nas ETEs, e não valores absolutos. A necessidade de um levantamento mais confiável já foi percebida pelas áreas responsáveis pelas ETEs, e um sistema de qualidade para esta atividade começa a ser delineado. É conveniente informar que esta atual precariedade de informações acompanha o comportamento da maioria das indústrias com relação a seus resíduos (JOHN, 2000). Há controle estatístico sobre os dados da atividade principal e um desconhecimento a respeito dos resíduos.

¹ TOBIEZI, P. R. (Sasa Sistemas Ambientais – Grupo francês Vivendi Environnement, Tremembé). Comunicação pessoal, 2002.

Figura 5.7 Distâncias rodoviárias médias aproximadas dos trajetos de transporte de lodos (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998).

A segunda observação a partir dos dados operacionais refere-se às caracterização do esgoto bruto que chega em cada estação, assim como do esgoto tratado. Para expor estas características de uma forma objetiva considerou-se apenas o parâmetro de Sólidos em Suspensão Totais (SST), apresentados na Tabela 5.5. Nota-se que a carga poluente do esgoto bruto que chega a cada estação pode ser bem diferente; porém como o esgoto tratado tem valores de SST mais próximos, atendendo aos padrões legalmente exigidos, isto implica num teor de SST removido diferente para cada estação. Fica evidenciada assim uma certa regularidade na eficiência do tratamento e do atendimento aos padrões de lançamento no corpo hídrico, porém para garantir esta regularidade cada estação reterá resíduos sólidos em taxas diferentes em relação a vazão tratada.

Tabela 5.5 Taxas de Sólidos em Suspensão Totais.

ETE	SST Esgoto Bruto (mg/L)	SST Esgoto Tratado (mg/L)	SST removido (mg/L)
ABC	168	11	157
BAR	188	17	171
PNM	212	24	188
SMG	360	18	342
SUZ	331	18	313

Observação 1: Sólidos em Suspensão Totais (SST) - Parcela dos sólidos orgânicos ou inorgânicos que não estão dissolvidos, é a parcela não filtrável, logo estes números não representam os Sólidos Totais (ST), uma vez que a parcela dos Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), subdividida em minerais e voláteis, não está incluída.

Observação 2: Esses valores são médias anuais feitas a partir dos respectivos valores médios mensais de jul/01 a jun/02.

Fonte: SABESP (2002), adaptada.

Outra informação importante neste reconhecimento da geração de resíduos é a aplicação de produtos químicos. No caso do tratamento de esgotos, condicionadores químicos orgânicos e/ou inorgânicos são utilizados para obtenção de melhor desempenho no processo de desidratação dos lodos. A Tabela 5.6 expõe os diferentes produtos e suas taxas de aplicação. Também foram apresentados percentuais destacando o quanto estes condicionadores representam na massa da torta de lodo produzida.

Tabela 5.6 Condicionadores químicos para 01 tonelada de torta de lodo base úmida.

ETE	Cal		Cloreto de Ferro		Polímero		% de condicionantes
	kg	%	kg	%	kg	%	
ABC	69,0	6,9	55,0	5,5	-	-	12,40
BAR	-	-	15,5	1,6	1,3	0,10	1,70
PNM	144,2	14,4	58,4	5,8	-	-	20,20
SMG	-	-	-	-	0,5	0,05	0,05
SUZ	56,4	5,6	27,7	2,8	-	-	8,40

Todos estes indicadores apresentam extremas diferenças entre si, deixando claro que as tortas de lodo de cada uma das cinco ETES têm características diferentes quer seja pelas quantidades de condicionadores quer seja pela natureza dos mesmos, e antes de mais nada pelas próprias diferenças entre os esgotos afluentes às ETES.

Com a intenção de explicitar as diferenças entre as cinco ETES, foram calculadas as taxas de geração de resíduos ao longo do tratamento a partir das Tabelas 5.4 e 5.5 – período de julho de 2001 a junho de 2002 (SABESP, 2002). Todas as taxas referem-se a um metro cúbico de esgoto bruto. A seguir, são apresentados gráficos para comparar estas taxas, evidenciando ainda mais a não uniformidade entre as estações.

Ao se analisar as taxas de material gradeado e de remoção de areia das cinco ETES representadas nos gráficos das Figuras 5.8 e 5.9, fica evidente a diferença entre os esgotos das várias regiões da cidade.

Quanto às taxas de geração de torta, Figura 5.10, as diferenças operacionais entre as ETES são muito claras. A ETE Suzano, por exemplo, apesar de consumir 67% dos mesmos condicionadores que a ETE ABC por metro cúbico de esgoto bruto, produz quase 5 vezes mais torta que a ETE ABC. O gráfico da Figura 5.11 apresenta as taxas de Sólidos em Suspensão Totais Removidos, onde se nota que a ETE Suzano remove pouco mais que o dobro da ETE ABC. Diferenças como estas podem ser explicadas por particularidades do processo de cada estação, bem como, e até como maior relevância, pela proporção entre esgotos domésticos e industriais que chegam

a cada ETE. Atualmente cerca de 70% dos esgotos que entram na ETE Suzano são de origem industrial, enquanto que na ETE ABC a maior contribuição é doméstica.

Figura 5.8 Taxa de geração de material gradeado em 1 m³ de esgoto.

Figura 5.9 Taxa de geração de areia em 1 m³ de esgoto.

Figura 5.10 Taxa de geração de torta de lodo em 1 m³ de esgoto.

Figura 5.11 Taxa de geração de SST removido em 1 m³ de esgoto.

Contra-pondo-se os dados dos gráficos das Figuras 5.10 e 5.11, na busca de estabelecer-se uma relação entre as taxas de geração de torta de lodo com as taxa de SST removidos, constata-se que as ETEs Barueri, Parque Novo Mundo e Suzano possuem taxas de geração de torta maiores que as de SST removidos, enquanto que com as ETEs ABC e São Miguel ocorre o contrário. Diferenças entre teores de orgânicos e inorgânicos, graus de eficiência da digestão, tipo e teor de condicionadores, proporção entre parcelas doméstica e industrial, geração de SST nos tanques de aeração, idade do lodo, etc, enfim, variáveis que podem ser listadas e combinadas de outras tantas formas para explicar tais diferenças.

Além disto, também, devem ser relatadas as interferências na obtenção destes dados em uma ETE, como a instalação dos pontos de coleta, amostragem, problemas na metodologia de análise das amostras, além de dificuldades na medida das vazões, com descargas diferentes, quer por caminhões limpa fossa, quer pela própria rede.

5.3 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES

Com base nos dados operacionais das ETEs da RMSP, sendo a vazão de esgoto bruto atualmente tratada de 10,50 m³/s, tem-se anualmente 328 milhões de m³ de esgoto sendo tratados, o que implica em 120 mil toneladas de torta de lodo (base úmida) geradas por ano. Adotando-se uma massa específica aparente média de 1,1 t/m³, o volume de lodo anual pode ser representado como um prédio de 145 andares, com previsão de quadruplicar este volume em 2015.

Existe portanto a necessidade de buscar várias alternativas para reciclagem das tortas, levando-se em conta suas quantidades expressivas, bem como a garantia de sua produção, uma vez que o processo de tratamento de esgotos é uma constante necessidade. As quantidades bem menores de material gradeado, areia e material peneirado, respectivamente 0,5%, 2,5% e 0,4% da produção das tortas, não despertam interesse para um estudo exclusivo, porém conforme o processo de reciclagem que envolva as tortas, a incorporação destes é uma possibilidade.

Uma outra observação importante e que serve de diretriz para uma abordagem de reciclagem das tortas de lodo é que cada ETE deve ser estudada individualmente. Pelos dados analisados, foi possível perceber que todas tem características próprias: quantidade e qualidade dos sólidos removidos, fluxo de processos, processos (volumes e tempos), condicionadores diferentes entre si, e mesmo quando do mesmo tipo apresentam dosagens diferentes em função do teor de sólidos. Além disto estas ETEs estão em áreas muito distintas na RMSP, com vazões de tratamento e geração de quantidades muito diferentes. Para isto a metodologia de estudo para reciclagem proposta neste trabalho levanta um elenco de possibilidades tecnicamente viáveis, que devem então ser ponderadas com todas as características de cada ETE para a escolha da melhor alternativa a ser pesquisada.

Contudo, a garantia de produção é discutível, não do ponto de vista da continuidade do tratamento de esgoto, mas sim da regularidade do processo. Diante dos dados apresentados percebe-se que as cinco ETEs ainda estão aperfeiçoando sua fase sólida. Mudanças de processo estão ocorrendo, e conseqüentemente adaptações operacionais são necessárias. Isto implica em paradas de tratamento, muitas vezes longas, alterações sensíveis nos resíduos gerados e com isso uma dificuldade de comprometimento com outras empresas, nas quais o resíduo da Sabesp venha a ter importância de matéria-prima.

Entre as cinco ETEs, apenas a ETE Barueri tem oferecido maior estabilidade na operação da fase sólida. A ETE ABC está tratando esgoto bombeado do Rio Tamanduateí em caráter provisório para atingir a cota mínima para funcionamento das bombas, uma vez que as obras de interligação que conduziriam os esgotos captados na bacia para a estação não foram executadas. A ETE PNM ainda tem dificuldades na fase de desidratação mecânica dos lodos. A ETE SMG tem sofrido problemas na digestão dos lodos, motivo pelo qual não há valores de produção de gás. Os lodos adensados, não digeridos, tem seguido diretamente para a desidratação mecânica. A ETE Suzano, uma das mais antigas, estuda a alteração do processo de condicionamento químico de inorgânico para o orgânico, ou seja, substituição da cal

e do cloreto férrico por polímeros. Esta alteração foi realizada pela ETE Barueri a partir do ano de 2001, baseada nos estudos de MIKI (1998), e significou sensível redução de custo no condicionamento, rendimento da operação de desidratação, além da redução do volume das tortas.

A busca de alternativas de gestão é mais eficaz após a estabilização dos processos de geração das tortas de lodo. Da mesma forma, métodos de levantamento de dados operacionais padronizados são necessários para o próprio controle, conhecimento detalhado e desenvolvimento dos processos na ETE.

Além do mais, analisando a rotina atual destas ETEs, um paradoxo ambiental destaca-se. Não se discute a necessidade do tratamento de esgotos, e muito menos seu papel de despoluição da água, e assim de parte do ambiente. Logo as tortas de lodo de esgoto devem continuar a serem geradas, porém são resíduos de um processo cujo objetivo é beneficiar o ambiente. Este mesmo processo benéfico dispõe seu resíduo em aterros, mobilizando caminhões e suas emissões de poluentes, gerando um passivo gigantesco numa área de solo, e deixando de evitar a degradação de outras áreas para extração de matéria-prima para outros setores, que poderia em parte ser substituída por este resíduo.

Uma outra realidade da RMSP deve ser definitivamente considerada pela Sabesp, e refere-se à complicada situação da disposição de resíduos em aterros sanitários. Em primeiro lugar os dois aterros sanitários da capital – Bandeirantes, na zona norte, e São João, na zona leste – estão com sua capacidade quase esgotada (MISSO, 2003).

O Plano Diretor de Resíduos Sólidos da RMSP (HICSAN; ETEP, 1994) preconizava novas áreas para aterros, porém seu levantamento de áreas aptas para este fim registra complexidade desta questão. No município de São Paulo nenhuma área nova foi proposta, e das 18 áreas vistoriadas nas regiões sudeste, sudoeste, noroeste, leste e norte da RMSP, a maioria ou está em Área de Proteção de Mananciais ou já sofre pressão popular contra a instalação de aterros. Aliado a isto deve-se destacar que

tratam-se de outros municípios com legislações distintas, que possuem seus próprios resíduos para administrar, além de estarem relativamente distantes da capital.

A Prefeitura de São Paulo busca soluções para a disposição das mais de 18 mil toneladas por dia de resíduos sólidos municipais (CETESB, 2003) baseando-se em princípios de reciclagem, menor geração de resíduos e conseqüente aumento da vida útil dos aterros. Por exemplo, o aterro Bandeirantes pode mudar seu modelo de gestão, deixando de usar argila de fora para fechamento das células e passar a usar o material que já está lá há tempo suficiente para ser reutilizado; e o aterro São João pode ser expandido para uma área adjacente, que já foi desapropriada para esta finalidade (GOLDENSTEIN, 2002). Também estão sendo desenvolvidos trabalhos para tratar o chorume dentro do próprio aterro.

Tudo isto indica que o convênio entre a Prefeitura de São Paulo e a Sabesp tem vida curta, uma vez que a Prefeitura também enfrenta o problema comum de escassez de áreas adequadas para aterro na RMSP.

A área destinada ao aterro exclusivo para disposição dos resíduos de tratamento da Sabesp, foi invadida e a tramitação jurídica tem se mostrado desfavorável para a Sabesp. Apesar de que a proposta do aterro exclusivo, conforme o Plano Diretor, não deveria ser a solução final e sim uma área de armazenagem, enquanto outras soluções deveriam ser pesquisadas (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998).

Restam apenas os aterros particulares, que neste contexto não são uma alternativa para a Sabesp, pois se até mesmo os hipotéticos custos de transporte e disposição em aterros públicos, em torno de R\$ 70,00 por tonelada (ETEP; ESTÁTICA; JNS, 1998), são considerados extremamente impactantes no balanço financeiro das ETES, valores maiores nem são cogitados.

Dos sete incineradores industriais cadastrados no Estado de São Paulo², apenas dois estão em municípios que compõem a RMSP, porém novamente os custos aliados à quantidade de resíduo gerado nas ETEs inviabilizam esta solução, que pode variar de R\$ 1.000,00 a R\$ 1.300,00 por tonelada.

Recentemente propostas de aquisição de um incinerador pela própria Sabesp vêm sendo discutidas. Ainda são discussões insipientes que tentam equacionar os custos de aquisição com a contrapartida da geração de energia em uma instalação deste tipo.

O co-processamento foi descartado pois as cotações feitas pela Sabesp são de no mínimo R\$ 70,00 por tonelada, além do transporte para regiões distantes da capital, ou mesmo outros estados.³

Diante de tudo isto, estudos para identificar outras formas de tratamento estão ganhando destaque, ratificando as recomendações do Plano Diretor de Uso/Disposição dos Lodos das ETEs da RMSP.

² MORITA, D. M. (Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental - CETESB, São Paulo). Comunicação pessoal, 2001.

³ GODOY, S. (Resotec – Divisão da Holcim Brasil, São Paulo); SACAMOTO, Y. (SABESP, São Paulo). Comunicações pessoais, 2003.

CAPÍTULO 6

CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

O conhecimento do resíduo é o fator principal na escolha de um processo de reciclagem. As informações que a Sabesp possui sobre as tortas de lodo são pertinentes ao controle da qualidade do tratamento, além de caracterizações com vistas à classificação ambiental do resíduo conforme a NBR 10004 (ABNT, 1987). Apesar de importantes, estes dados não são suficientes para a decisão de um processo de reciclagem (JOHN, 2000). Assim, neste capítulo os dados das áreas operacionais da Sabesp são complementados por resultados de pesquisas nacionais e internacionais, selecionados através da revisão bibliográfica com a intenção de fornecer parâmetros no lugar dos dados inexistentes, bem como a realização de alguns ensaios na EPUSP.

6.1 Torta de lodo de esgoto e Péletes

As características dos lodos são o resultado de vários fatores, como a composição do esgoto, o processo e o grau de tratamento desse esgoto, o processo de tratamento do lodo, etc (TSUTIYA et al, 2001).

Como os lodos são classificados pelos tratamentos que sofrem, os lodos da RMSP são lodos secundários, ativados e digeridos, com exceção dos lodos da ETE PNM, uma vez que esta ETE não possui digestor, e portanto seus lodos são secundários, ativados e não digeridos.

Com vistas a uma análise de reciclagem serão apresentados os dados de caracterização existentes sobre as tortas e os péletes conjuntamente, uma vez que tais dados provem de um número escasso de análises e entendendo-se que a diferença crucial entre tortas e péletes está no teor de umidade.

6.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Os dados para caracterização física dos resíduos de ETEs apresentados na Tabela 6.1 foram levantados a partir da pesquisa realizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A – IPT – para caracterização de propriedades geotécnicas de tortas de lodo e péletes.

Tabela 6.1 Índices físicos de resíduos de ETE.

Índices físicos	unidade	Torta de Barueri	Pélete de Barueri
Massa específica dos sólidos ¹	kg/m ³	1.923	
Massa específica dos grãos ²	kg/m ³		1.787
Massa específica aparente dos grãos ¹	kg/m ³		1.364
Massa específica aparente do conjunto ¹	kg/m ³	1.032	953
Absorção de água ¹	%		42
Teor de matéria orgânica (440°C)	%	51	51
Teor de umidade base úmida ³	%	75	12
Composição granulométrica ⁴			
Pedregulho 5 mm ≤ Ø < 76 mm	%	-	20
areia grossa 2 mm ≤ Ø < 5 mm	%	-	80
areia média 0,4 mm ≤ Ø < 2 mm	%	-	-
areia fina 0,05 mm ≤ Ø < 0,4 mm	%	13	-
silte 0,005 mm ≤ Ø < 0,05 mm	%	47	-
argila Ø < 0,005 mm	%	40	-

Obs.: Ensaios realizados pelo IPT no ano de 2002.

Nota: 1) NBR 6458 (ABNT, 1984), 2) NBR 6508 (ABNT, 1984),
3) NBR 6457 (ABNT, 1986), 4) NBR 7181 (ABNT, 1984).

No relatório do IPT não consta a forma de coleta e amostragem. A data de coleta foi março de 2002. As análises foram feitas através dos instrumentos e conceitos da Mecânica dos Solos:

- massa específica dos sólidos é a relação entre a massa de sólidos e o seu volume;

- massa específica dos grãos é a relação entre a massa de sólidos e o volume dos grãos, incluindo-se no cálculo do volume os vazios (poros) dos grãos não ocupados pela água, após imersão por 24 horas;
- massa específica aparente dos grãos é a relação entre a massa de sólidos e o volume dos grãos, incluindo-se no cálculo do volume os vazios (poros) dos grãos ocupados ou não pela água, após imersão por 24 horas;
- massa específica aparente do conjunto é a relação da massa total com o volume total;
- absorção de água é a relação entre a massa de água absorvida pelos grãos, após imersão por 24 horas, e a massa de sólidos.

Os péletes apresentam elevada absorção de água, devido ao grande número de poros e por serem expansivos, e baixa massa específica aparente do conjunto, em decorrência desses fatores e do alto teor de matéria orgânica, o que pode eventualmente fazer com que eles flutuem quando submersos.

Os iguais valores médios dos teores de matéria orgânica das tortas e dos péletes da mesma ETE, logo mesmo processo de geração e condicionamento do lodo, indicam que, no processo de produção dos péletes, não ocorre volatilização significativa de matéria orgânica.

6.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Uma distinção importante a ser feita em análises químicas é o método utilizado. A Tabela 6.2 foi composta a partir de análises químicas de diferentes laboratórios, que para essas características usaram métodos de análise e formas de expressão dos resultados diferentes e nem sempre explícitas. A análise da CETESB foi a única a expressar os resultados tal como apresentado na Tabela 6.2. A principal dúvida na

expressão dos resultados está na discriminação dos percentuais sobre base seca ou úmida, deixando em aberto se a umidade foi ou não considerada dentro da perda ao fogo, comprometendo assim o levantamento do teor de matéria orgânica. Os métodos são nomeados com códigos internos de cada laboratório, não permitindo o reconhecimento imediato dos mesmos e dificultando comparações que podem até serem incorretas.

Tabela 6.2 Teor de sólidos, umidade, voláteis e não voláteis em resíduos de ETE.

Material amostrado			Torta	Torta	Torta	Péletes
Laboratório			ABCP	CETESB	F. Bauer*	ABCP
Ano da análise			1999	2000	2002	2002
Características			Cal e cloreto	Polímero e cloreto		
Umidade (a 105°C)	u	%		22,60		8,98
Sólidos totais (a 105°C)	ST	%		77,04		91,02
Cinzas (a 800°C)	SF	%		33,60		39,42
Perda ao fogo	PF	%	26,23**	43,44	59,96	51,60

* Laboratório de Análises Falcão Bauer.

** Método de análise: Termogravimetria.

A análise química completa dos resíduos de lodo de esgoto não faz parte das rotinas operacionais das ETEs, desta forma as duas análises existentes fazem parte de duas investigações da Sabesp para disposição dos resíduos de tratamento de esgoto nos fornos de cimento. A Tabela 6.3 apresenta estas análises químicas para torta e péletes provenientes da ETE Barueri, porém com condicionamentos diferentes. A torta de lodo ensaiada provém de condicionamento com cal e cloreto férrico, aplicado nesta estação até o final do ano de 1999. Os péletes foram produzidos a partir de lodo condicionado com polímeros e cloreto férrico, sistema atual nesta ETE.

Tabela 6.3 Análise química de resíduos das ETes Barueri e Suzano.

Parâmetros		Amostras			
		Torta ETE BAR	Péletes	Torta ETE BAR	Torta ETE SUZ
Condicionadores		Cal e FeCl ₃	Polímero	Polímero	Cal e FeCl ₃
Laboratório / ano		ABCP / 1999	ABCP / 2002	EPUSP / 2003	EPUSP / 2003
Composição Química					
Na ₂ O	%	0,31*	0,25	0,49	0,37
MgO	%	1,50*	4,04	1,20	1,17
Al ₂ O ₃	%	10,00*	29,27	13,30	9,88
SiO ₂	%	12,00*	45,55	26,50	13,5
P ₂ O ₅	%	5,50*		10,40	6,33
SO ₃	%	4,40*	0,11	11,50	7,78
Cl	%	1,10*		0,34	0,39
K ₂ O	%	0,75*	1,27	1,07	0,51
CaO	%	45,00*	6,96	11,60	39,3
TiO ₂	%	1,30*		1,81	1,00
Cr ₂ O ₃	%			0,30	0,38
MnO	%	0,12*		0,12	0,21
Fe ₂ O ₃	%	17,00*	12,55	19,20	16,0
Co ₃ O ₄	%				0,04
NiO	%			0,13	0,26
CuO	%			0,36	0,25
ZnO	%			0,97	1,40
Br	%			<<	
Rb ₂ O	%			0,01	
SrO	%	0,25*		0,04	0,16
Y ₂ O ₃	%			0,01	
ZrO ₂	%	0,07*		0,08	0,16
Nb ₂ O ₅	%			<<	
SnO ₂	%	0,07*		0,11	0,03
BaO	%			0,16	0,32
WO ₅	%			0,06	
PbO	%			0,06	0,10
Zn	%	0,18**			
Ni	ppm	213,2**			
Cu	ppm	431,6**			
Pb	ppm	44,7**			
Cr	ppm	480,8**			
Cd	ppm	1,0**			
Perda ao fogo	%			72,27	59,25

Obs.:

1) Laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP.

* Método de análise: espectrometria de raios X.

** Método de análise: absorção atômica.

*** Método de análise: complexometria.

2) Laboratório da Escola Politécnica da USP – EPUSP.

Método de análise: semiquantitativa, por fluorescência de raios X, sem padrões de Flúor a Urânio.

Resultados em % de óxidos, base calcinada a 1.050°C, normalizados a 100%. << = traços (menor que 0,01%)

Os resultados desta análise evidenciam como espécies químicas principais os óxidos de silício, alumínio e ferro, além da cal nas ETEs onde ainda é utilizada como condicionador. A redução do teor de cal com a mudança de condicionamento por polímeros, como na ETE Barueri, é muito significativa.

A tabela 6.4 apresenta uma análise complementar dos teores de enxofre, carbono, hidrogênio e nitrogênio. É possível destacar o maior teor de carbono e uma equivalência de cerca de 10% de nitrogênio, o que contribui para obtenção de melhores valores de poder calorífico, também apresentados nesta tabela.

Tabela 6.4 Análise química complementar e poder calorífico.

Material amostrado			Torta **	Torta **	Torta **	Pélete **	Pélete ***	Pélete ***
Condicionadores			Cal e cloreto	Polímero e FeCl ₃				
Composição Química			1999*	2000*	2002*		2002*	
Enxofre	S	%	0,30	1,20	-	1,30	-	-
Carbono	C	%	21,40	29,40	-	24,73	-	-
Hidrogênio	H	%	3,50	4,80	-	4,36	-	-
Nitrogênio	N	%	2,10	3,20	-	2,90	-	-
Poder calorífico superior	PCS	MJ/kg	7,70	13,00	1,02	3,99	-	-
Poder calorífico inferior	PCI	MJ/kg	6,90	12,00	-	3,07	12,56	13,95

Obs.: Resíduos provenientes da ETE Barueri.

* Ano de realização da análise.

** Métodos de ensaios da ABCP.

*** Ensaio realizado na Escola Politécnica da USP.

O poder calorífico de um combustível é seu valor térmico potencial, sendo a quantidade de calor, em unidades energéticas, gerada pela combustão completa de uma unidade em massa ou volume do material, sendo possível definir poderes caloríficos superior e inferior. A medida do poder calorífico superior é aquela na qual é considerado, também, o calor latente do vapor d'água eventualmente presente no combustível durante a queima, e cedido ao meio durante sua condensação. Na prática

industrial, no entanto, os gases são perdidos pelas chaminés, não sendo aproveitado o calor de condensação do vapor d'água. Este é o poder calorífico inferior e o valor de maior interesse a ser levantado.

Há incongruências entre alguns dos valores de poder calorífico da Tabela 6.4, provavelmente por diferenças no tratamento dado às amostras antes do teste, como por exemplo secagem a 110° C. A bibliografia corrente faz referência a valores entre 11 e 12 MJ/kg (WERTHER, OGADA, 1999), o que é consistente com os valores avaliados nesta pesquisa. Além disto, um produto como o pélete, com reduzido teor de umidade, obter valores inferiores ao da torta, gera mais dúvidas, mesmo com procedimento comum de ensaiar as amostras secas. Os valores entre 11 e 12 MJ/kg conferem ao resíduo a equivalência aos valores de poder calorífico da lenha (PETROBRÁS, 2002).

Na Escola Politécnica, a metodologia utilizada para efetuar a medida do poder calorífico do lodo de esgoto foi a mesma utilizada para combustíveis sólidos ou líquidos através de bomba calorimétrica. Para tanto a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - determina que sejam seguidas as normas da American Society for Testing and Materials - ASTM - nos D407-44, D 271-58 e D 240-57 T (MELO et al., 2003). Com o objetivo de confirmar os resultados encontrados nas análises realizadas na Escola Politécnica, estas foram refeitas em junho de 2003, usando material remanescente das mesmas amostras coletadas em dezembro de 2002. Os resultados obtidos foram:

PCI Torta ETE Suzano	=	697,76 cal/g	=	2,92 MJ/kg
PCI Torta ETE Barueri	=	902,85 cal/g	=	3,78 MJ/kg
PCI Péletes	=	2.196,08 cal/g	=	9,19 MJ/kg
PCS Torta ETE Suzano	=	1.030,16 cal/g	=	4,31 MJ/kg
PCS Torta ETE Barueri	=	1.235,25 cal/g	=	5,17 MJ/kg
PCS Péletes	=	2.251,48 cal/g	=	9,42 MJ/kg

Como estas amostras ficaram mais de seis meses armazenadas no laboratório, é necessário considerar a perda de voláteis devido à biodeterioração, gerando valores de poder calorífico menores que os medidos na mesma amostra há meses atrás. Entretanto, estes valores são capazes de confirmar os valores medidos anteriormente para os péletes.

Estes valores, apesar de prejudicados, também são úteis para reafirmar a relação da composição das tortas com o poder calorífico. Os valores das tortas da ETE Barueri são superiores ao da ETE Suzano, como já se esperava, uma vez que nestas últimas devido ao condicionamento com cal, possuem em sua composição menor teor de matéria orgânica – responsável pelo poder calorífico.

6.4 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

Além da análise química elementar, é necessário o reconhecimento das fases presentes no material. Em 1999, a ABCP realizou uma análise através de difratometria de raios X numa amostra de torta de lodo digerido e condicionado com cal e cloreto férrico, proveniente da ETE Barueri antes da adoção de polímeros como condicionadores. O resultado identificou os principais compostos cristalinos e permitiu inferir que a fração não volátil do resíduo é constituída essencialmente por calcita e quartzo, e por teores menores de feldspato, mica e caulinita. Tratava-se de uma amostra condicionada com cal, logo a maior frequência de calcita era esperada.

Buscando dados atuais, as amostras de tortas de lodo coletadas em dezembro de 2002 foram submetidas a novas difratometrias de raios X na EPUSP. A Figura 6.1 apresenta as curvas de difração de raios X e suas interpretações. Os principais compostos cristalinos identificados foram novamente a calcita (carbonato de cálcio), caulinita, mica, quartzo e feldspato. Apenas a calcita não foi detectada na amostra da ETE Barueri, o que era esperado, uma vez que nesta ETE a cal não é mais utilizada no condicionamento. O quartzo é areia e os demais compostos são componentes argilosos. Ambos são carregados do ambiente para as redes coletora e passam a constituir a fase inorgânica dos lodos.

As curvas de difração de raios X, expostas abaixo, confirmam os componentes argilosos da fase mineral dos lodos.

Onde: C = carbonato de cálcio; K = caulinita; M = mica; Q = quartzo

Figura 6.1 Curvas de difração de raios X.

A mesma amostra foi submetida a uma outra metodologia de análise. As análises termodiferencial e termogravimétrica são procedimentos que baseiam suas inferências nas modificações experimentadas pelo material em decorrência do seu aquecimento. A curva termodiferencial permite identificar compostos que sofrem reações químicas ou estruturais em resposta ao incremento de temperatura, enquanto a curva termogravimétrica possibilita a quantificação das perdas de massa envolvidas nestes processos.

As tabelas 6.5 e 6.6 sintetizam, respectivamente, as reações inferidas pela curva termodiferencial e as perdas de massa determinadas para a torta de lodo condicionado com cal e cloreto férrico.

Tabela 6.5 Reações determinadas na torta de lodo.

Temperatura do pico (°C)	Natureza da reação	Interpretação
70	endotérmica	Perda de água livre e/ou adsorvida
325-360	exotérmica	Decomposição de material orgânico
710	endotérmica	Perda de CO ₂ de carbonato

Obs.: Ensaio realizado pela ABCP em 1999.

Tabela 6.6 Perdas de massa determinadas na torta de lodo.

Perda de massa (em %) nos intervalos de temperatura entre:			Teor de CaCO ₃ (%)
20-125°C	125-520°C	520-900°C	
2,81	16,86	6,56	14,91

Obs.: Ensaio realizado pela ABCP em 1999.

Esta análise termogravimétrica, totalizando uma perda ao fogo de 26,23%, mostra-se contraditória aos dados levantados nas análises químicas, bem como da sua umidade. Dada a inexistência de memorial sobre sua realização, apenas é possível supor que a amostra ensaiada tenha sido seca em estufa *a priori*, e que o teor de matéria orgânica mais reduzido, deve-se ao teor de cal adicionada no condicionamento, reduzindo o percentual da matéria orgânica sobre a massa total.

6.5 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

Dada a necessidade da classificação ambiental de um resíduo com vistas à sua destinação final, as análises indicadas pela NBR 10004 (ABNT, 1987) são as mais comumente encontradas nas empresas geradoras de resíduo. As Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os resultados obtidos pelos pólitos submetidos a esta análise.

Tabela 6.7 Resultados da análise dos pólitos pela NBR 10004/87.

Parâmetro	Lixiviado		Solubilizado		Amostra bruta	
	Resultado (mg/l)	Limites (mg/l)	Resultado (mg/l)	Limites (mg/l)	Resultado (mg/kg)	Limites (mg/kg)
Alumínio (Al)			0,14	0,2		
Arsênio (As)	< LQ	5,0	< LQ	0,05	< LQ	1000
Bário (Ba)	1,43	100	0,04	1,0		
Berílio (Be)					< LQ	100
Cádmio (Cd)	< LQ	0,5	< LQ	0,005		
Chumbo (Pb)	0,08	5,0	< LQ	0,05	149,0	1000
Cianeto (CN)			0,10	0,1	< LQ	1000
Cloreto (Cl)			426,9	250		
Cobre (Cu)			< LQ	1,0		
Cromo Total (Cr)	< LQ	5,0	< LQ	0,05		
Cromo VI (Cr)					< LQ	100
Dureza (em CaCO ₃)			3760	500		
Ferro (Fe)			20,7	0,3		
Fluoreto (F)	0,09	150	0,27	1,5		
Índice de Fenóis			1,18	0,001	4,7	10
Manganês (Mn)			0,32	0,1		
Mercurio (Hg)	< LQ	0,1	< LQ	0,001	< LQ	100
Nitrato (como N)			< LQ	10		
Prato (Ag)	< LQ	5,0	< LQ	0,05		
Selênio (Se)	< LQ	1,0	< LQ	0,01	< LQ	100
Sódio (Na)			32,2	200		
Sulfato (SO ₄)			19,3	400		
Surfactantes			0,07	0,2		
Vanádio (V)					44,3	1000
Zinco (Zn)			1,65	5,0		

Obs.: 1) Para a análise de lixiviação o pH é ajustado em $5,0 \pm 0,2$ através da adição de ácido acético.

2) O pH medido no ensaio de solubilização foi 6,89.

3) LQ = limite de quantificação.

Tabela 6.8 Parâmetros complementares na massa bruta dos péletes.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Cádmio	mg Cd/kg	8,58
Cobre	mg Cu/kg	536,5
Cromo Total	mg Cr/kg	446,0
Fósforo	mg P/l	5369,1
Molibdênio	mg Mo/kg	7,26
Níquel	mg Ni/kg	239,8
Nitrato	mg N/kg	7,98
Nitrito	mg N/kg	< LQ
Nitrogênio Total	mg N/kg	23626,5
Nitrogênio Amoniacal	mg N/kg	17,62
Potássio	mg K/kg	1457,0
Sódio	mg Na/kg	306,4
Zinco	mg Zn/kg	2228,0
TOC	%	25,33
<i>Coliformes fecais</i>	NMP/100 ml	< 0.03
<i>Salmonella</i>	NMP/100 ml	Negativa

Obs.: 1) LQ = limite de quantificação
 2) NMP = número mais provável
 3) pH = 6,60

Trata-se apenas de uma única amostra, objetivando ilustrar a metodologia de classificação ambiental. É um procedimento caro e realizado por laboratórios externos à Sabesp, logo há pequeno número de ensaios disponíveis e são desprovidos de periodicidade, por isso não foram considerados numa análise de variabilidade.

Os parâmetros de lixiviação e massa bruta analisados apresentaram concentrações inferiores às indicadas nas listagens da NBR 10004 (ABNT, 1987), entretanto quanto ao ensaio de solubilização os parâmetros cloreto, dureza, ferro, manganês e índice de fenóis apresentaram concentrações superiores às definidas nesta norma. Assim como em outras análises, quer de torta de lodo, quer de péletes, a classificação mais comum é a de Resíduo Classe II – Resíduo Não Inerte.

Além das análises pela NBR 10004, são executadas análises de alguns parâmetros nos laboratórios das próprias ETEs de forma periódica. Entre estes parâmetros estão alguns metais citados no documento CETESB P 4.230, que rege a aplicação de lodos

de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas. Dentre estes dados dos laboratórios da Sabesp, foram selecionados aqueles referentes ao período de setembro de 2001 a outubro de 2002, e apresentados na Tabela 6.9, juntamente com duas referências européias, de período não publicado, porém capaz de permitindo uma comparação genérica da variabilidade dos teores de metais nos lodos.

Tabela 6.9 Variação do teor de metais em tortas de lodos de diferentes ETEs.

Parâmetro [mg / kg]		ETEs da RMSP				Outras ETEs		Limites	
		ABC	BAR	SMG	SUZ	França	Dinamarca	P 4230	NBR 10004
Cádmio	Máx.	19	17,2	3,5	29	2	2,9	85	
	Mín.	9	8,6	1,8	3	0	0,6		
Chumbo	Máx.	288	211	72	410	1.960	140	840	1.000
	Mín.	176	111	24	185	56	13		
Cobre	Máx.	1.059	666	156	838	320	930	4.300	
	Mín.	839	479	61	577	67	110		
Manganês	Máx.	1.590	321	178	1.909	ND	1.200		
	Mín.	698	220	114	567	ND	160		
Ferro	Máx.	58.400	39.287	48.657	46.408	ND	ND		
	Mín.	45.000	24.900	22.137	33.324	ND	ND		
Níquel	Máx.	250	398	593	877	0	0	420	
	Mín.	178	232	260	191	0	0		
Prata	Máx.	36	75	10,1	ND	ND	ND		
	Mín.	26	54	0,3	ND	ND	ND		
Zinco	Máx.	3.176	3.402	622	7.595	1.800	1.700	7.500	
	Mín.	2.270	1.999	336	2.002	195	490		
Molibdênio	Máx.	18	16	21,4	249	ND	15	75	
	Mín.	7	12	0,5	21	ND	4		
Cromo Total	Máx.	693	867	241	2.367	106	99		
	Mín.	344	447	46	550	26	18		

Notas:

- 1) Os teores das cinco ETEs da RMSP referem-se ao período de setembro de 2001 a outubro de 2002. Análises executadas pelos laboratórios da Sabesp.
- 2) Os valores da Dinamarca referem-se às análises de 14 ETEs (SLOOT et al, 1997).
- 3) Os valores da França referem-se às análises de 8 ETEs (SLOOT et al, 1997).
- 4) ND = dado não disponível.

As diferenças entre os teores de cada metal entre as ETEs pode ser atribuído *a priori* às características do esgoto de cada região. As variações dentro de uma ETE podem estar relacionadas a sazonalidades nos processos industriais, muitas vezes com lançamentos clandestinos na rede coletora.

Na Tabela 6.9, pode-se observar as variações dos teores de metais, como massa bruta, ao longo do período de um ano. Nas análises pela NBR 10004 (ABNT, 1987) os parâmetros de massa bruta e lixiviado, rotineiramente, não apresentam valores acima dos limites desta norma, sendo classificados como resíduos classe II, não inertes. Quanto à norma P 4.230 (CETESB, 1999), para uso agrícola, o níquel tem-se mostrado acima do limite. Entretanto os teores de cádmio e cobre são tão inferiores. Porém, um item muito importante em termos de armazenagem do resíduo é a lixiviação, e esta pode ter mais fatores intervenientes que não estão sendo considerados nas análises químicas.

A seguir, também são apresentadas as séries históricas de metais nas tortas de lodo da ETE Barueri, bem como de seu esgoto afluente, realizadas no laboratório da Sabesp, respectivamente nas Tabelas 6.10 e 6.11. Os números em vermelho indicam limite de norma excedido, e parecem poucos, exceção ao Cromo. No entanto, por vezes, esses resíduos em laboratórios externos à Sabesp são classificados como Perigosos e não como Não Inertes. Os laboratoristas da Sabesp atribuem isto à metodologia de preparo da amostra, e sugerem uma discussão a este respeito.

Outras vezes o problema é com Fenol, e sua metodologia de análise. Um ensaio mais simples, o colorimétrico, identifica compostos fenólicos, e assim pode estar indicando substâncias oriundas da decomposição de vegetais. Porém um ensaio mais caro e sofisticado, a cromatografia gasosa, tem demonstrado que este não é o caso da ETE Barueri, que tem apontado valores 500 vezes superior de Fenol (C_6H_5OH) em relação ao limite para Resíduo Classe II, o que o classifica indiscutivelmente como Classe I, Resíduo Perigoso, conforme a NBR 10.004 (ABNT, 1987).

Tabela 6.10 Série histórica de metais em tortas de lodo da ETE Barueri (1ª parte)

Metal	Ag (mg/kg)					Cu (mg/kg)					Cd (mg/kg)					Cromo Total (mg/kg)					Fe (mg/kg)				
Limite (1)						4.300 mg/kg					85 mg/kg														
Mês \ Ano	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003
janeiro	*	22,1	67,8	66,3	42,9	*	534	595	516	734	*	9,9	9,6	8,6	16,3	*	282	378	458	438	*	40620	29990	25176	32822
fevereiro	43,8	16,8	53,8	65,7	41,5	743	679	586	666	660	10,0	9,6	8,4	14,7	17,5	261	281	391	447	331	45227	38080	25910	37367	37367
março	36,2	45,8	46,6	57,7	40,6	551	485	688	479	577	9,4	8,8	8,6	14,1	12,5	207	228	323	497	453	44840	37660	29720	34900	36280
abril	14,8	30,9	54,2	55,5		611	429	712	516		10,1	8,9	9,2	15,6		222	267	557	580		43730	32960	37180	32883	
maio	*	50,6	63,0	56,0		*	461	710	590		*	9,2	10,2	15,5		*	303	629	662		*	37549	28580	32789	
junho	16,7	43,5	70,2	57,3		563	475	738	614		9,1	10,2	10,0	17,2		291	295	753	771		35740	35120	29910	32300	
julho	*	44,5	35,8	70,7		*	437	711	549		*	8,4	14,2	13,5		*	355	704	725		*	33067	29040	37116	
agosto	45,2	*	60,6	59,4		619	*	544	535		8,9	*	12,8	15,3		425	*	580	680		42300	*	40780	27107	
setembro	59,3	*	67,8	53,9		580	*	573	574		10,0	*	13,0	10,9		414	*	761	665		43213	*	33593	30440	
outubro	15,0	54,4	65,4	53,8		554	683	579	608		8,8	12,0	10,8	13,9		225	632	580	622		38560	28360	38992	31160	
novembro	20,3	17,6	74,8	54,3		583	622	631	700		9,8	10,4	10,7	15,8		336	608	867	775		42733	31150	33755	29640	
dezembro	39,0	76,8	67,4	54,0		643	704	549	787		12,6	14,0	11,7	15,8		364	370	490	891		43320	27600	39287	31060	
MÉDIA ANUAL	32,3	40,3	60,6	58,7	41,7	605	551	635	595	657	9,9	10,1	10,8	14,2	15,4	305	362	584	648	407	42185	34217	33061	31828	35490

Obs.:

- 1) Limite fixado pela P 4.230 (CETESB, 1999).
- 2) (*) Dado não disponível.

Tabela 6.10 Série histórica de metais em tortas de lodo da ETE Barueri (2ª parte)

Metal	Mn (mg/kg)					Ni (mg/kg)					Pb (mg/kg)					Zn (mg/kg)				
Limite (1)						420 mg/kg					840 mg/kg					7.500 mg/kg				
Mês \ Ano	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003
janeiro	*	221	208	220	232	*	236	322	330	258	*	189	174	169	153	*	1812	2248	2154	1956
fevereiro	452	217	187	249	245	338	228	358	284	284	207	200	170	211	151	2076	1328	1568	2090	1845
março	233	199	183	262	268	230	207	326	232	230	163	161	167	111	168	1474	1272	2096	1999	2035
abril	245	147	162	321		290	180	334	263		169	115	203	131		1784	1131	2388	2002	
maio	*	175	189	283		*	204	358	311		*	154	191	171		*	1430	2600	2192	
junho	263	177	190	262		297	198	394	319		164	145	200	165		1790	1172	2236	2226	
julho	*	186	210	228		*	234	356	325		*	124	203	154		*	1539	2688	2443	
agosto	343	*	335	261		325	*	340	275		78,0	*	165	189		1160	*	2152	2783	
setembro	377	*	326	248		295	*	351	259		142	*	151	165		1080	*	2304	2402	
outubro	289	193	227	289		299	339	335	298		71,5	199	150	147		1898	2652	2230	2381	
novembro	333	184	227	231		302	303	398	368		105	174	173	175		2013	2316	2446	2444	
dezembro	290	201	236	245		304	335	379	441		144	182	177	203		2078	2192	2202	2632	
MÉDIA ANUAL	314	190	223	258	248	298	246	354	309	257	138	164	177	166	157	1706	1684	2263	2312	1945

Obs.:

- 1) Limite fixado pela P 4.230 (CETESB, 1999).
- 2) (*) Dado não disponível.

Tabela 6.11 Série histórica de metais nos esgotos afluentes a ETE Barueri (1ª parte)

Metal	Ag (mg/L)					Cu (mg/L)					Cd (mg/L)					Cromo Total (mg/L)					Fe (mg/L)				
Limite (1)	1,5 mg/L					1,5 mg/L					1,5 mg/L					5,0 mg/L					15 mg/L				
Mês/Ano	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003
janeiro	*	0,025	0,009	0,008	0,018	*	*	*	0,05	0,45	*	*	*	0,002	0,006	*	*	*	0,04	0,13	*	*	*	2,65	4,85
fevereiro	0,011	0,013	0,004	0,014	0,009	*	*	*	0,06	0,07	*	*	*	0,008	0,012	*	*	*	0,11	0,10	*	*	*	3,32	3,09
março	0,018	0,012	0,002	0,012	0,009	*	*	*	0,06	0,10	*	*	*	0,008	0,002	*	*	*	0,07	0,09	*	*	*	3,02	4,24
abril	0,089	0,009	0,015	*		*	*	*			*	*	*			*	*	*			*	*	*		
maio	0,011	0,009	0,014	0,009		*	*	*	0,12		*	*	*	0,007		*	*	*	0,10		*	*	*	2,60	
junho	0,013	0,008	0,013	0,015		*	*	*	0,11		*	*	*	0,008		*	*	*	0,10		*	*	*	3,00	
julho	0,017	0,009	0,009	0,008		*	*	*	0,07		*	*	*	0,008		*	*	*	0,09		*	*	*	2,00	
agosto	0,018	0,009	0,015	0,016		*	*	*	0,10		*	*	*	0,006		*	*	*	0,17		*	*	*	5,30	
setembro	0,043	0,011	0,013	0,013		*	*	*	0,11		*	*	*	0,009		*	*	*	0,13		*	*	*	3,39	
outubro	0,013	0,011	0,012	0,012		*	*	*	0,10		*	*	*	0,008		*	*	*	0,25		*	*	*	5,16	
novembro	0,013	0,012	0,015	0,010		*	*	*	0,14		*	*	*	0,005		*	*	*	0,14		*	*	*	3,44	
dezembro	0,013	0,011	0,008	0,010		*	*	*	0,10		*	*	*	0,009		*	*	*	0,19		*	*	*	2,80	

Obs.:

- 1) Limite fixado pelo Decreto nº 8468 (CETESB, 1976), que estabelece os limites para lançamento de poluentes em sistemas de esgotos.
- 2) (*) Dado não disponível.

Tabela 6.11 Série histórica de metais nos esgotos afluentes a ETE Barueri (2ª parte)

Metal	Mn (mg/Kg)					Ni (mg/Kg)					Pb (mg/Kg)					Zn (mg/Kg)				
Limite (1)	Mn (mg/Kg)					Ni (mg/Kg)					Pb (mg/Kg)					Zn (mg/Kg)				
Mês/ Ano	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003	1999	2000	2001	2002	2003
janeiro	*	*	*	0,09	0,13	*	*	*	0,06	0,11	*	*	*	0,03	0,05	*	*	*	0,23	0,43
fevereiro	*	*	*	0,10	0,10	*	*	*	0,02	0,01	*	*	*	0,04	0,03	*	*	*	0,28	0,41
março	*	*	*	0,08	0,13	*	*	*	0,05	0,06	*	*	*	0,02	0,03	*	*	*	0,20	0,41
abril	*	*	*	*		*	*	*	*		*	*	*	*		*	*	*	*	
maio	*	*	*	0,09		*	*	*	0,08		*	*	*	0,02		*	*	*	0,38	
junho	*	*	*	0,08		*	*	*	0,08		*	*	*	0,01		*	*	*	0,34	
julho	*	*	*	0,08		*	*	*	0,07		*	*	*	0,02		*	*	*	0,29	
agosto	*	*	*	0,08		*	*	*	0,07		*	*	*	0,03		*	*	*	1,17	
setembro	*	*	*	0,09		*	*	*	0,10		*	*	*	0,03		*	*	*	0,53	
outubro	*	*	*	0,11		*	*	*	0,09		*	*	*	0,02		*	*	*	0,38	
novembro	*	*	*	0,09		*	*	*	0,09		*	*	*	0,03		*	*	*	0,55	
dezembro	*	*	*	0,11		*	*	*	0,08		*	*	*	0,03		*	*	*	0,55	

Obs.:

- 1) Limite fixado pelo Decreto nº 8468 (CETESB, 1976), que estabelece os limites para lançamento de poluentes em sistemas de esgotos.
- 2) (*) Dado não disponível.

6.6 Lixiviação e localização dos metais no lodo

Um estudo altamente especializado de lixiviação coordenado por SLOOT et al (1997) apresenta alguns comportamentos peculiares aos resíduos de tratamento de esgoto analisados em 19 ETEs da Europa.

O lodo das Estações de Tratamento de Esgoto pode ser considerado como um resíduo específico complexo porque compreende uma matriz sólida intimamente associada a uma matriz orgânica e biológica.

Os ensaios de lixiviação utilizados normalmente são direcionados para a avaliação da massa poluente contida no resíduo e taxas de desprendimento de contaminantes para a fase aquosa através de transferências físico-químicas. No caso do desprendimento de contaminantes a partir de lodos de esgoto, a solubilização do elemento mineral ou orgânico pode ser vista como o resultado da interação de alguns fatores, como:

- a heterogeneidade da matriz do lodo;
- a biodegradação da fração orgânica contida no lodo;
- a extração por lixiviação dos elementos solúveis na fração digerida;
- o impacto do metabolismo desses elementos desprendidos sobre o processo de digestão do lodo através de difusão dentro da biomassa.

O elemento mineral presente no lodo está distribuído em formas químicas diferentes, ou adsorvido ou em equilíbrio entre a fase sólida e a fase líquida. Estas formas dependem da origem dos elementos minerais. Eles podem estar presentes no efluente descarregado na estação na forma dissolvida, coloidal ou finamente divididos. A forma do elemento mineral depende também da natureza química (iônico ou complexo).

A mobilidade do elemento mineral contido no lodo está associada com a estrutura do lodo, seu pH, potencial de oxirredução, e condicionamento. Contudo, a mobilidade também depende do estado de degradação do lodo.

Na digestão anaeróbia do lodo, mais de 90% dos metais estão fixados nas frações granulométricas maiores do lodo, incluindo aglomerados de frações orgânicas e minerais (GOULD, 1978 apud SLOOT et al, 1997). Este fenômeno está representado na Tabela 6.12; trata-se de uma distribuição genérica, sendo que o artigo técnico que publicou-a não apresentou a distribuição granulométrica dos lodos estudados, nem os teores de matérias orgânica e inorgânica.

Tabela 6.12 Distribuição genérica dos metais dentro das frações granulares do lodo.

Metal	Particulado (> 100 µm) %	Supra coloidal (0,6 a 100 µm) %	Coloidal (0,002 a 0,6 µm) %	Dissolvido (< 0.002 µm) %
Cádmio	90,4	8,2	1,4	0
Cromo	92,9	7,1	0	0
Cobalto	92,8	7,2	0	0
Cobre	92,9	6,9	0,1	0,1
Ferro	95,5	4,4	0,1	0
Manganês	95,5	3,4	0,1	1,0
Níquel	95,0	5,0	0	0
Chumbo	92,1	7,3	0,3	0,3
Zinco	91,5	8,4	0,04	0,06

Fonte: SLOOT et al (1997).

A mobilidade dos elementos metálicos está estreitamente ligada ao tratamento de estabilização do lodo, bem como aos processos de condicionamento e desidratação.

A digestão anaeróbia do lodo tem um efeito eficaz na imobilização de metais devido à formação de sulfetos metálicos, os quais tem uma baixa solubilidade. Os ensaios de

extração de metais de lodo digerido anaerobiamente, usando água régia (mistura de 3 partes de ácido clorídrico e 1 parte de ácido nítrico), demonstraram que a fração de metal passível de extração foi muito baixa, representando em média 10% dos elementos totais (SIDDLE, 1977 apud SLOOT et al, 1997).

O pH do ambiente influencia a solubilização dos elementos minerais fixados no lodo. O cálcio, o ferro e o zinco são intensamente mobilizados e solubilizados em $\text{pH} = 7$ até $\text{pH} = 5$, ao passo que, outros elementos como o fósforo são apenas mobilizados significativamente em valores de pH menores que 5 (SCOTT, 1975 apud SLOOT et al, 1997).

O zinco, o cádmio, e o níquel são os metais mais solúveis em ambientes ácidos em oposição ao chumbo e ao cromo. Isto ocorreu em todos os lodos analisados por SLOOT et al (1997), devendo ser destacado que a quantidade de metais solubilizados depende não apenas do valor de pH final, mas também das quantidades de ácido e da composição granulométrica da amostra envolvida (incluindo compostos minerais e orgânicos).

6.7 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES

Os lodos gerados nas ETEs apresentam-se potencialmente poluidores ao meio ambiente devido a existência de três componentes dos mesmos: organismos patogênicos, matéria orgânica e metais pesados.

Os organismos patogênicos e a matéria orgânica são inerentes aos esgotos sanitários e conseqüentemente às tortas de lodo. Além da disseminação dos primeiros e da DBO em meio aquático da segunda, a combinação das duas atrai vetores.

Os lodos de ETEs da RMSP apresentam também metais pesados, provenientes da atividade industrial praticada em áreas urbanas. Lembrando que a RMSP possui um número de indústrias que constitui o maior parque industrial do hemisfério sul. O

conceito das ETEs pressupõe o recebimento de esgotos de origem predominantemente doméstica, sendo o próprio sistema de tratamento empregado decorrente deste fato. O lançamento de efluentes industriais é regulamentado pela legislação ambiental, sendo objetivada nesta regulamentação principalmente a preservação dos tratamentos biológicos utilizados nas ETEs. Uma primeira consideração a ser efetuada diz respeito às proporções das componentes doméstica e industrial nos esgotos. Quanto maior a presença de atividade industrial na bacia drenada, maior será a proporção de metais pesados nos lodos, ainda que respeitados os limites de concentração destes nas descargas industriais. A própria viabilização da operação das ETEs depende do controle de descargas industriais.

Entretanto a questão dos efluentes industriais pede duas formas de abordagem: (1) o recebimento formal, e, (2) os lançamentos clandestinos.

A Sabesp, assim como outras empresas de saneamento, recebe formalmente (1) resíduos industriais de empresas cadastradas, atividade esta que gera receita para a empresa de saneamento. Este recebimento formal se dá de dois modos, ou através de tubulação diretamente, ou através de caminhões limpa fossa em pontos de recebimento na própria ETE ou em Estação Elevatória.

A ETE Barueri, por exemplo, recebe efluentes industriais na Estação Elevatória do Piqueri, onde após análises expeditas, os caminhões lançam os efluentes em tubulação que segue até a ETE. A ETE São Miguel recebe efluentes de caminhões, e diretamente em rede da empresa Nitroquímica. A ETE Suzano recebe efluentes de caminhões e também por tubulação da empresa Clariant.

Os lançamentos clandestinos (2) também podem se dar de dois modos, ou através de descargas noturnas em poços de visita por caminhões limpa fossa, ou por lançamentos diretamente na rede coletora, muitas vezes oriundo de processos industriais informais e que geram vazões discretas, porém com alta concentração de poluentes.

A presença de poluentes perigosos – metais pesados e compostos orgânicos – compõe o principal aspecto poluidor dos lodos da RMSP, gerando uma incompatibilidade crucial entre o interesse de gerar um lodo em condições de ser disposto na agricultura, e ao mesmo tempo receber efluentes industriais. Esta é certamente a maior incoerência na área de saneamento básico da RMSP.

Outra consideração a ser feita é referente aos ensaios e análises necessários para a verificação da possibilidade de incorporação de resíduos de tratamento de esgotos em materiais de construção e outros usos industriais. Estas análises certamente não fazem parte das rotinas das empresas de saneamento.

Por exemplo, os materiais cerâmicos processados compreendem um vasto grupo na engenharia, entre eles a cerâmica vermelha e o cimento Portland. Assim, os ensaios e análises de caracterização de matérias-primas deste setor constituem uma referência inicial e segura a ser utilizada na análise dos resíduos de esgoto que se pretende reciclar, tanto neste setor como em setores semelhantes.

Nestes produtos, as propriedades das matérias-primas são alteradas na sua composição química, estrutura cristalina e arranjo das diversas fases constituintes. Isto faz com que a interpretação das propriedades das matérias-primas para materiais cerâmicos deva ser feita em termos de indentificação das fases constituintes, arranjo destas fases ou microestrutura, constituição química e características físicas. A difração de raios X, a análise química completa, a caracterização física e a classificação ambiental são algumas das técnicas de estudo necessárias inicialmente na avaliação da incorporação de resíduos de esgoto em produtos cerâmicos.

CAPÍTULO 7

SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA OS LODOS DE ETES

Neste ponto do trabalho, como já foi mencionado, o desenvolvimento das atividades deu-se em parceria com a elaboração da tese de ZORDAN (2003), que sugere uma metodologia para operacionalizar a proposta de JOHN (2000) na seleção das alternativas de reciclagem para prosseguimento em pesquisa e desenvolvimento.

Nesta proposta distinguem-se quatro fases consecutivas:

- a) geração de um dossiê do resíduo;
- b) entrevistas com especialistas;
- c) avaliação dos sistemas de reciclagem;
- d) seleção das alternativas sustentáveis.

Tais fases, componentes desta etapa do Plano de Trabalho, foram executadas conforme segue.

7.1 GERAÇÃO DO “DOSSIÊ DO RESÍDUO”

As informações levantadas nos Capítulos 5 e 6 desta dissertação, respectivamente sobre a produção e caracterização dos resíduos de ETES, foram resumidas num dossiê da torta de lodo de esgoto da ETE Barueri. Este dossiê pode ser visto no ANEXO B, e foi usado nas entrevistas da fase seguinte. Uma vez que as entrevistas demandam tempo disponível dos especialistas, foi necessário restringir o trabalho em um único resíduo, e consequentemente estudou-se apenas a torta de lodo de esgoto da ETE Barueri. Esta escolha se deu por dois motivos: (1) esta torta é condicionada com polímero, tendência da maioria das ETES da RMSPP para o futuro e (2) maior regularidade no processo da fase sólida desta ETE em relação às demais.

7.2 ENTREVISTAS COM ESPECIALISTAS

As entrevistas foram realizadas pessoalmente com oito especialistas de áreas distintas, de forma a aumentar a diversidade de alternativas propostas. Este total de entrevistados foi limitado pela disponibilidade dos mesmos, sendo desejável um número maior, e cuja representação abrangesse a maior gama possível de diferentes setores produtivos, permitindo avaliar o potencial interesse destes setores em reciclar as tortas de lodo de esgoto.

Os setores dos especialistas entrevistados e suas respectivas áreas de atuação estão relacionados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 Setores e áreas dos especialistas consultados.

Setor	Área
Construção	Aglomerantes, agregados, concretos e argamassas.
Pavimentação	Materiais para pavimentação.
Indústria cerâmica	Materiais cerâmicos.
Mineração	Caracterização tecnológica de recursos minerais.
Indústria metalúrgica	Metalurgia.
Indústria cimenteira	Produção de clínquer e co-processamento.

Durante as entrevistas, os especialistas tinham acesso à caracterização do resíduo, mas desconheciam a sua identidade, evitando assim que idéias preconcebidas sobre o resíduo interferissem na sua avaliação. Para esta avaliação os especialistas tiveram acesso apenas ao dossiê, de maneira a fazer com que a avaliação estivesse baseada na interação entre as características das tortas de lodo de esgoto e do setor de cada especialista.

As entrevistas foram conduzidas utilizando-se um conjunto de seis formulários: (1) Interesse pelo resíduo, (2) Análise técnica, (3) Análise ambiental, (4) Análise ocupacional, (5) Análise de mercado, e (6) Análise econômica. Todos os formulários, preenchidos pelos oito especialistas consultados, estão disponíveis no ANEXO C.

Entre os formulários dois deles tem formato simplificado. Isto se deve ao fato de que no decorrer das entrevistas notou-se uma divisão entre os especialistas. Dois deles (Especialistas A e G) mostraram-se mais distanciados do setor industrial, porém portadores de uma visão mais ampla das potencialidades do resíduo. Em novos trabalhos, pode-se partir de especialistas com este perfil para obtenção de sugestões dos setores da economia a serem investigados, para em seguida buscar os profissionais envolvidos nestes setores para uma entrevista mais detalhada quanto aos processos industriais, dados econômicos e de mercado.

Apesar da liberdade de respostas, os formulários disciplinavam a geração de resultados numéricos, mesmo a partir de informações qualitativas, buscando esboçar indiretamente os possíveis sistemas de reciclagem. A especificação do sistema de reciclagem só pode ser feita durante o próprio processo de pesquisa e desenvolvimento. Sendo assim, optou-se por um esboço deste sistema através das influências e mudanças eventualmente trazidas pela introdução do resíduo nos setores investigados.

Concluída a entrevista, a origem do resíduo era revelada, e freqüentemente as opiniões mudavam. O preconceito em relação aos resíduos de tratamento de esgotos fizeram com que alguns especialistas voltassem atrás sobre posições favoráveis a reciclagem da torta de lodo de esgoto em seus setores. Isto vem a ratificar que, a análise das potencialidades deste resíduo é muitas vezes pautada em preconceitos, em detrimento das suas características físico-químicas, que são desconhecidas pelos demais setores da economia, e até mesmo pelo seu gerador.

Os resultados das entrevistas são apresentados e discutidos a seguir.

7.2.1 Interesse pela torta de lodo de esgotos

O primeiro momento da entrevista, após apresentado o dossiê, conduzia ao formulário “Interesse pelo Resíduo”, sob o título “Usos Possíveis na Área”. A partir das oito entrevistas, foram identificadas as seguintes alternativas, reunidas na Tabela 7.2. Cada uma delas obteve a indicação de dois especialistas. As duas áreas dos

especialistas que não reconheceram nenhuma forma de aproveitamento do resíduo foram Pavimentação e Metalurgia.

Tabela 7.2 Alternativas com interesse nas tortas de lodo de esgoto.

Alternativa	Código
Agregado leve para a confecção de argamassas e concretos.	A
Matéria-prima e energia para a produção de cimento (co-processamento).	B
Matéria-prima para a produção de cerâmica vermelha.	C

A alternativa do agregado leve para confecção de argamassas e concretos está formulada na sinterização da torta de lodo para produção do agregado, aproveitando a queima da matéria orgânica e a existência de quantidade apreciável de sílica e cálcio na composição das tortas. Uma outra alternativa aventada nas entrevistas foi o uso das tortas de lodo para recuperação de solos degradados por atividades de mineração e de terraplenagem, que não foi explorada devido a falta de disponibilidade de especialistas deste setor.

7.2.2 Razões do interesse pela torta de lodo de esgotos

Neste segundo momento da entrevista, o objetivo foi identificar as características do resíduo que despertaram o interesse do especialista em usá-lo em seu setor de atuação. Também procurou-se definir as características que representassem desvantagens do resíduo para aquele setor. No formulário “Análise Técnica”, estes dados foram registrados sob os títulos “Pontos Positivos” e “Pontos Negativos”. Os dados de todas as entrevistas foram organizados e apresentados na Tabela 7.3.

As vantagens e desvantagens não foram usadas para hierarquizar as alternativas, e sim para listar os requisitos de desempenho para cada alternativa. Assim considerou-se o parecer de uso possível dado pelo especialista para continuidade deste trabalho, armazenando-se estas informações para a pesquisa e desenvolvimento posteriores.

Tabela 7.3 Pontos positivos e negativos para reciclagem das tortas de lodo de esgoto.

Alternativas	Pontos Positivos	Pontos Negativos
A	- grande quantidade de sílica e cálcio - granulometria apropriada (finos)	- grande quantidade de matéria orgânica - cheiro desagradável do resíduo
B	- presença de alumínio, sílica e ferro - presença de matéria orgânica	- quantidade elevada de água - quantidade elevada de enxofre e álcalis - poder calorífico baixo
C	- presença de cálcio, sílica e alumínio - presença de matéria orgânica (fornece plasticidade à mistura)	- grande quantidade de enxofre - grande quantidade de água - odor exalado pelo resíduo - presença de fósforo - presença de cromo

7.2.3 Especificação dos sistemas de reciclagem

Como mencionado anteriormente, nesta entrevista ainda não é possível propriamente especificar o sistema de reciclagem, por exemplo todos os processos que serão necessários para esta reciclagem. Entretanto no terceiro momento destas entrevistas, através dos quatro últimos formulários – “Análise Ambiental”, “Análise Ocupacional”, “Análise de Mercado” e “Análise Econômica” – buscou-se extrair e avaliar as mudanças que a introdução da torta de lodo de esgoto traria nos processos propostos por cada especialista para as alternativas por eles mesmos sugeridas.

Encerradas as entrevistas, todos os formulários preenchidos foram organizados e estão disponíveis no ANEXO C, como já mencionado.

7.3 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE RECICLAGEM

Um dos princípios essenciais da metodologia de ZORDAN (2003) para identificar a “vocação” de um resíduo para a reciclagem é a **Sustentabilidade**, isto é, além de viável tecnicamente, a aplicação deve ser sustentável, considerando-se aspectos econômicos e de mercado, bem como os possíveis riscos ao meio ambiente e ao ser humano.

A estrutura desta análise de sustentabilidade foi focada nos pontos positivos e negativos do resíduo, já apresentados no item 7.2.2, uma vez que o caráter preliminar das entrevistas não permitia uma abordagem dos principais processos que podem ocorrer nas três alternativas de sistemas de reciclagem sugeridas por estes mesmos especialistas.

Os dados levantados nas entrevistas, sobre as alternativas de sistemas de reciclagem, obtidos nos formulários “Análise Ambiental”, “Análise Ocupacional”, “Análise de Mercado” e “Análise Econômica”, foram utilizados para avaliar como estes mesmos sistemas de reciclagem, propostos pelos especialistas, comportam-se frente aos temas homônimos a estes formulários.

7.3.1 Avaliação ambiental dos sistemas de reciclagem

O objetivo deste item é avaliar o desempenho ambiental dos sistemas de reciclagem, isto é, a forma como estes sistemas interagem com o meio ambiente, comparando seus impactos ambientais para o estabelecimento hierárquico de melhor desempenho das alternativas propostas. Logo a mensuração do desempenho é função dos impactos negativos causados; quanto maiores os impactos, pior é o desempenho do sistema.

7.3.1.1 Critérios de avaliação

Conforme a proposta de ZORDAN (2003) o dimensionamento dos impactos seguiu as seguintes premissas:

- O **impacto ambiental** total gerado por um sistema de reciclagem é equivalente à soma dos impactos gerados por cada **aspecto ambiental** deste sistema;
- O **potencial** de geração do impacto pelo sistema é diretamente proporcional ao potencial de ocorrência do aspecto e à **significância** do aspecto para o meio ambiente;
- A significância de cada aspecto para o meio ambiente é equivalente à soma da significância dos impactos gerados por ele.

O trabalho de ZORDAN (2003), com o auxílio de profissionais especializados em avaliações ambientais, relacionou os aspectos ambientais considerados mais críticos em sistemas de reciclagem como sendo:

- Consumo de água;
- Consumo de energia;
- Consumo de combustível;
- Consumo de matéria-prima;
- Geração de efluentes;
- Geração de emissões;
- Geração de resíduos sólidos;
- Geração de ruídos;
- Contaminantes lixiviados.

Apesar da existência de muitos outros aspectos ambientais possíveis de ocorrer nos sistemas de reciclagem, a quantidade limitada da listagem acima é justificada pela simplicidade e rapidez propostas pela metodologia.

Esta relação de aspectos foi apresentada no formulário “Análise Ambiental” aos especialistas consultados, juntamente com a escala de mensuração da Tabela 7.4, para que estes avaliassem o potencial de ocorrência do aspecto diante do uso da torta de lodo em seus processos.

Tabela 7.4 Escala para avaliação ambiental dos sistemas de reciclagem.

Comportamento do aspecto ambiental	Valor atribuído
Aspecto diminui muito	-5
Aspecto diminui	-3
Aspecto permanece praticamente o mesmo	0
Aspecto aumenta	3
Aspecto aumenta muito	5

ZORDAN (2003) também selecionou categorias de impactos ambientais para cada aspecto, e novamente consultando profissionais especializados em avaliações ambientais, através de critérios como efeito, escala, gravidade e probabilidade de

ocorrência, calculou a significância de cada aspecto, como apresentado na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 Significância dos aspectos ambientais (ZORDAN, 2003).

Aspectos	Significância
Consumo de água	7,6
Consumo de matéria-prima	7,8
Consumo de combustíveis	9,1
Consumo de energia	8,5
Geração de efluentes "A"	6,5
Geração de efluentes "B"	7,8
Geração de efluentes "C"	8,6
Geração de emissões	8,4
Geração de resíduos Classe I	8,2
Geração de resíduos Classe II	7,1
Geração de resíduos Classe III	6,2
Geração de ruídos	7,1
Contaminantes lixiviados	8,6

Observações:

- 1) Efluente "A" é aquele que possui materiais inertes ou em suspensão, tratável com processos físicos simples (decantação, sedimentação, filtração); não gera lodo Classe I.
- 2) Efluente "B" é aquele que requer tratamento biológico (materiais dissolvidos) e/ou desinfecção (organismos patogênicos), sem gerar lodo Classe I.
- 3) Efluente "C" é aquele que apresenta constituintes perigosos como metais pesados, solventes óleos e graxas, etc.; tratamento gera lodo Classe I.

A mensuração do desempenho ambiental é expressa pelo somatório do produto do potencial de ocorrência do impacto pela significância do impacto, para todos os aspectos do sistema. Desta forma, é possível avaliar a dimensão do impacto gerado por cada aspecto, e consequentemente o desempenho global do sistema de reciclagem.

7.3.1.2 Resultados da avaliação para tortas de lodo de esgotos

A Tabela 7.6 apresenta os potenciais de ocorrência dos principais aspectos ambientais dos sistemas de reciclagem, causados por mudanças nos processos tradicionais de produção em consequência da incorporação das tortas de lodo de esgoto. O potencial de ocorrência é a média dos valores indicados pelos especialistas nos formulários das entrevistas.

Tabela 7.6 Potencial de ocorrência dos aspectos nos sistemas de reciclagem analisados.

Sistema de Reciclagem	Mudança no processo	Potencial de Ocorrência (média)
A – Agregado leve para argamassas e concretos	Consumo de energia elétrica	+3
	Consumo de matéria-prima	-3
	Consumo de combustível	-3
B - Matéria-prima e energia para produção de cimento (co-processamento)	Consumo de energia	+5
	Consumo de matéria-prima	-3
	Geração de emissões	+3
	Geração de efluentes	+5
C - Matéria-prima para cerâmica vermelha	Consumo de água	-3
	Consumo de energia	+3
	Consumo de combustível	-3
	Consumo de matéria-prima	-3
	Geração emissões	+4
	Geração efluentes	+3

Uma observação importante em relação ao sistema A é que os especialistas não identificaram a geração de efluentes, proveniente da secagem das tortas de lodo, antes delas serem sinterizadas para retirar a matéria orgânica. Isso porque a queima pode ocorrer por um sistema que não necessite da pré-secagem. Caso o processo seja outro, e o lodo precise ser seco, poderia haver também a geração de efluentes. No entanto, estas incertezas são inerentes a uma análise preliminar como esta, pois os processos que farão parte do sistema de reciclagem ainda não estão definidos.

Multiplicando-se o potencial de ocorrência pela significância de cada aspecto apresentado na Tabela 7.5 é possível gerar uma nota para cada uma das alternativas de sistemas de reciclagem propostas pelos especialistas (ZORDAN, 2003).

Assim, a mensuração do desempenho ambiental de cada sistema, conforme o critério do item 7.3.1.1 é apresentada nas Tabelas 7.7, 7.8, e 7.9. O impacto ambiental gerado por cada aspecto foi calculado através da multiplicação do potencial de ocorrência deste aspecto – Tabela 7.5 – pela sua respectiva significância – Tabela 7.6. O impacto ambiental total de cada sistema de reciclagem foi calculado através da soma dos impactos de cada aspecto deste sistema.

Tabela 7.7 Mensuração do desempenho ambiental do sistema de reciclagem A – AGREGADO LEVE

Sistema A – Agregado leve para argamassas e concretos			
Aspecto	Potencial de ocorrência	Significância	Impacto gerado
Consumo de energia	+ 3	8,5	25,5
Consumo de matéria-prima	- 3	7,8	- 23,4
Consumo de combustível	- 3	9,1	- 27,3
Desempenho ambiental global do sistema de reciclagem			- 25,2

Tabela 7.8 Mensuração do desempenho ambiental do sistema de reciclagem B – CIMENTO.

Sistema B – Matéria-prima e energia para produção de cimento (co-processamento)			
Aspecto	Potencial de ocorrência	Significância	Impacto gerado
Consumo de energia	+ 5	8,5	42,5
Consumo de matéria-prima	- 3	7,8	- 23,4
Geração de emissões	+ 3	8,4	25,2
Geração de efluentes “B”	+ 5	7,8	39,0
Desempenho ambiental global do sistema de reciclagem			83,3

Tabela 7.9 Mensuração do desempenho ambiental do sistema de reciclagem C – CERÂMICA.

Sistema C – Matéria-prima para cerâmica vermelha			
Aspecto	Potencial de ocorrência	Significância	Impacto gerado
Consumo de água	- 3	7,6	22,8
Consumo de energia	+ 3	8,5	25,5
Consumo de matéria-prima	- 3	7,8	- 23,4
Consumo de combustível	- 3	9,1	- 27,3
Geração de emissões	+ 4	8,4	33,6
Geração de efluentes “B”	+ 3	7,8	23,4
Desempenho ambiental global do sistema de reciclagem			9,0

O impacto total de cada sistema de reciclagem representa o seu desempenho ambiental. Como os impactos considerados foram apenas os negativos ou danosos ao meio ambiente, quanto maior o valor numérico do impacto total, pior é o seu desempenho ambiental. Assim, os sistemas de reciclagem avaliados pelos especialistas como potencialmente viáveis apresentaram a hierarquia expressa pela Tabela 7.10.

O “desempenho relativo” foi calculado para salientar as diferenças entre os valores de desempenho ambiental de cada sistema. Isto foi feito atribuindo-se o valor 1 ao sistema com melhor desempenho, isto é, de menor valor de impacto ambiental total, através da adição da parcela 26,2. O mesmo foi feito para os outros dois sistemas, garantindo a manutenção das proporções entre os desempenhos dos três sistemas.

Tabela 7.10 Hierarquia dos sistemas de reciclagem pela avaliação ambiental.

Sistema de reciclagem	Desempenho	“Desempenho relativo”
A – Agregado leve para argamassas e concretos	-25,2	1,0
B – Matéria-prima e energia para produção de cimento	83,3	109,5
C – Matéria-prima para cerâmica vermelha	9,0	35,2

Conforme a tabela acima, os sistemas de reciclagem de tortas de lodo de esgotos apresentam a seguinte hierarquia quanto a desempenho ambiental:

- 1º) Sistema A apresenta melhor desempenho;
- 2º) Sistema C apresenta desempenho intermediário;
- 3º) Sistema B apresenta o desempenho mais desfavorável entre as três alternativas.

7.3.2 Avaliação de saúde ocupacional dos sistemas de reciclagem

O objetivo deste item é avaliar os riscos potenciais que os sistemas de reciclagem podem gerar ao ser humano, tanto no ambiente de trabalho, quanto no uso e descarte do material reciclado. Os riscos ocupacionais podem ser divididos em riscos de operação e riscos de ambiente. Os primeiros relacionam-se com condições precárias do processo operacional e de suas instalações, enquanto que o segundo trata das condições inseguras inerentes ao ambiente de trabalho, como a presença de gases e vapores tóxicos, ruído, radiações, etc. Neste trabalho, foram considerados somente os riscos ocupacionais de ambiente, uma vez que as instalações para reciclagem ainda não existem neste estágio. Os riscos são contabilizados para cada sistema de reciclagem avaliado, o que permite a sua comparação para o estabelecimento hierárquico entre os sistemas que oferecem maior e menor risco ocupacional entre as alternativas propostas pelos especialistas.

7.3.2.1 Critérios de avaliação

Conforme a proposta de ZORDAN (2003) o dimensionamento dos impactos seguiu os seguintes passos:

- Classificação das **atividades** do sistema de reciclagem dentro da fronteira estabelecida para a análise de risco;
- Identificação dos **perigos** significativos relacionados com cada atividade, considerando os possíveis prejudicados e a forma como isso pode ocorrer;
- Determinação do **grau de risco**, fazendo uma estimativa do risco associado com cada perigo.

O levantamento das atividades genéricas de um sistema de reciclagem consideradas para a identificação dos perigos, bem como esta identificação dos perigos foi realizada no trabalho de ZORDAN (2003), com o auxílio de especialistas em saúde ocupacional e medicina, obtendo-se os seguintes perigos críticos para este estudo:

- Ruídos;
- Vibrações;
- Frio;
- Calor;
- Esforço físico intenso;
- Radiações;
- Substâncias perigosas (explosivas, inflamáveis);
- Substâncias insalubres.

Esta relação de perigos foi apresentada no formulário “Análise Ocupacional” aos especialistas consultados para que estes identificassem a existência desses perigos nas novas atividades oriundas da incorporação das tortas de lodo de esgoto nos processos e atividades de seus setores de atuação.

A determinação do grau de risco é a combinação entre a probabilidade de um determinado perigo causar o dano e as suas consequências. ZORDAN (2003) também identificou os danos que cada perigo pode gerar, e consultando novamente

especialistas em saúde ocupacional e medicina, através de critérios como gravidade e probabilidade de ocorrência, calculou o grau de risco de cada perigo, os quais são apresentados na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 Graus de riscos envolvidos com os perigos (ZORDAN, 2003).

Perigos	Grau de Risco
Ruídos	4,7
Vibrações	3,3
Frio	3,5
Calor	4,2
Esforço físico intenso	3,7
Radiações não ionizantes	5,3
Radiações ionizantes corpusculares	5,8
Radiações ionizantes eletromagnéticas	6,0
Substâncias explosivas e inflamáveis	4,8

Observações:

- 1) Radiações não ionizantes: Raio laser, infra-vermelho, ultra-violeta, microondas.
- 2) Radiações ionizantes corpusculares: Raios α e Raios β .
- 3) Radiações ionizantes eletromagnéticas: Raios γ e Raios X.

A soma dos graus de risco de cada perigo fornece o grau de risco total de cada sistema de reciclagem avaliado. Para cada sistema, são considerados apenas os perigos identificados pelos especialistas no formulário “Análise Ocupacional”.

7.3.2.2 Resultados da avaliação para tortas de lodo de esgotos

A Tabela 7.12 apresenta os perigos informados nos formulários pelos especialistas para cada sistema de reciclagem e os processos que geram estes perigos. Também apresenta os graus de risco atribuídos a cada perigo – Tabela 7.11 – e o risco total do sistema envolvendo a saúde ocupacional dos envolvidos com os processos. Este risco total foi calculado a partir da simples soma dos graus de risco presentes em cada sistema.

Tabela 7.12 Riscos de saúde dos sistemas de reciclagem da tortas de lodo de esgoto.

Sistema de Reciclagem	Processo	Perigos	Grau de Risco	Risco do Sistema
A	Queima	Calor	4,2	12,2
	Moagem	Ruído	4,7	
		Vibração	3,3	
B	Secagem do lodo	Calor	4,2	4,2
C	Secagem do lodo	Calor	4,2	4,2

Legenda:

A – Agregado leve para argamassas e concretos

B - Matéria-prima e energia para produção de cimento

C - Matéria-prima para cerâmica vermelha

Conforme a tabela acima, os sistemas de reciclagem de tortas de lodo de esgotos apresentam a seguinte hierarquia quanto aos riscos de saúde operacional:

1º) Sistema B e Sistema C apresentam os mesmos riscos;

2º) Sistema A apresenta risco mais elevado.

Dois especialistas, um da Indústria Cerâmica e outro de Co-processamento, levantaram a questão de contaminação devido a presença de organismos patogênicos. Na relação de perigos também não estão incluídas as substâncias tóxicas, orgânicas e inorgânicas, as quais são muito importantes no caso de resíduos de tratamento de esgotos. Assim foram detectadas lacunas na listagem de graus de risco para contabilizar os perigos a elas associados.

7.3.3 Avaliação de mercado

O objetivo desta avaliação é realizar uma análise comparativa, rápida e simplificada, dos aspectos de mercado envolvidos com cada sistema de reciclagem tecnicamente viável, indicado pelos especialistas, de forma a criar-se uma classificação das alternativas com maiores possibilidades de sucesso no mercado.

7.3.3.1 Critérios de avaliação

Conforme a proposta de ZORDAN (2003) – embasada em entrevistas com técnicos das áreas econômica e de mercado – foram considerados na análise de mercado os

aspectos relacionados abaixo para avaliar o potencial sucesso do produto reciclado no mercado:

- 1) Concorrência com outros produtos:
 - a) Oferta de produtos concorrentes;
 - b) Tendência de novos produtos no mercado.
- 2) Inovações tecnológicas:
 - a) Vantagens tecnológicas do reciclado sobre os concorrentes;
 - b) Capacidade consumidor identificar vantagens tecnológicas;
 - c) Desenvolvimento tecnológico do mercado.
- 3) Incentivos aos produtos/ sistemas de reciclagem:
 - a) Incentivos fiscais;
 - b) Incentivos legais.
- 4) Demanda para o produto reciclado:
 - a) Necessidade de produtos com as características técnicas do reciclado;
 - b) Valorização dos produtos sustentáveis pelos consumidores.
- 5) Aspectos do sistema produtivo:
 - a) Interesse da indústria recicladora na reciclagem do resíduo;
 - b) Escala produtiva do sistema de reciclagem.

Estes aspectos foram mensurados a partir de informações fornecidas durante as entrevistas aos especialistas de cada sistema de reciclagem analisado, como por exemplo indicadores de mercado. Em seguida, os sistemas foram avaliados através de uma análise hierárquica, de forma que a hierarquia fornecida indicasse os sistemas mais atrativos pelo enfoque de mercado.

7.3.3.2 Resultados da avaliação para tortas de lodo de esgotos

A Tabela 7.13 resume os valores médios da pontuação atribuída pelos especialistas. Estes valores foram atribuídos nos formulários de “Análise de Mercado” através de duas escalas numéricas de avaliação. Uma escala, variando de 0 a 5, foi usada para os incentivos fiscais, incentivos legais e necessidade de produtos com as características do produto reciclado. A outra escala, variando de 1 a 5, foi usada para os demais fatores avaliados. Ambas foram ordenadas de forma crescente, partindo da

pior condição para a melhor condição. Tais valores foram simplesmente somados para cada uma das três alternativas de sistemas de reciclagem propostas.

Tabela 7.13 Resumo da avaliação de mercado.

FATORES AVALIADOS	A	B	C
Concorrência com outros produtos			
Oferta de produtos concorrentes	1	1	1
Tendência de novos produtos no mercado	3	1	3
Inovações tecnológicas			
Vantagens tecnológicas do reciclado sobre os concorrentes	1	1	1
Capacidade consumidor identificar vantagens tecnológicas	5	NA	3
Desenvolvimento tecnológico do mercado	5	1	5
Incentivos aos produtos/ sistemas de reciclagem			
Incentivos fiscais	0	0	0
Incentivos legais	0	0	0
Demanda para o produto reciclado			
Necessidade de produtos com características do reciclado	0	0	1
Valorização dos "produtos verdes" pelos consumidores	1	1	2
Aspectos do sistema produtivo			
Interesse da indústria recicladora na reciclagem do resíduo	*	1	3
Escala produtiva do sistema de reciclagem	3	5	5
TOTAL	19	11	24

Nota:

NA = não avaliado

* A indústria ainda não existe.

Legenda:

A – Agregado leve para argamassas e concretos

B - Matéria-prima e energia para produção de cimento

C - Matéria-prima para cerâmica vermelha

Conforme o resultado apresentado na tabela acima, na sua linha total, o mercado mais favorável para a reciclagem das tortas de lodo de esgotos foi o da indústria cerâmica, seguido pelo mercado da construção civil, e por último o mercado de cimento, gerando a seguinte hierarquia quanto ao sucesso de mercado:

1º) Sistema C

2º) Sistema A

3º) Sistema B.

Entretanto, é importante destacar duas questões. A primeira é que devido à prematuridade da análise, as informações sobre as características técnicas do futuro produto reciclado são incertas, o que torna a avaliação mais próxima das impressões

de mercado do especialista, porém mais distante das características do produto a ser desenvolvido e lançado no mercado.

Outra questão é que o questionário reflete a visão pessoal dos especialistas sobre a receptividade para com a reciclagem, muitas vezes deixando que algum preconceito de inferioridade nesta prática norteie sua avaliação de mercado. Por exemplo, na indústria cimenteira há receptividade para a reciclagem das tortas de lodo, enquanto que na associação que lhes dá suporte técnico notou-se uma clara rejeição.

7.3.4 Avaliação econômica

O objetivo desta avaliação é realizar uma análise comparativa, rápida e simplificada, dos aspectos econômicos envolvidos com cada sistema de reciclagem tecnicamente viável, indicado pelos especialistas, de forma a criar-se uma classificação das alternativas economicamente mais atrativas.

7.3.4.1 Critérios de avaliação

Conforme a proposta de ZORDAN (2003) – embasada em entrevistas com técnicos das áreas econômica e de mercado – na análise econômica, a abordagem adotada deteve-se nos principais custos envolvidos em cada processo ou atividade do sistema de reciclagem:

- 1) Custos com investimento iniciais:
 - a) Investimentos em P&D;
 - b) Espaço físico para as instalações;
 - c) Compras de máquinas e equipamentos.
- 2) Custo de transporte:
 - a) Tipo de transporte (custo da tonelada transportada por quilômetro);
 - b) Distância de transporte.
- 3) Custos operacionais:
 - a) Mão-de-obra;
 - b) Consumo de energia e combustíveis;
 - c) Consumo de matéria-prima;

- d) Consumo de água.
- 4) Custos ambientais:
 - a) Possibilidade de reúso do material;
 - b) Reciclabilidade dos resíduos gerados;
 - c) Tecnologia de gerenciamento dos resíduos;
 - d) Quantidade de resíduos gerados.

Da mesma forma que os aspectos de mercado, estes aspectos econômicos foram mensurados a partir de informações fornecidas pelos especialistas de cada sistema de reciclagem analisado – custos diretos ou indicadores dos custos – e no final foram avaliados através de análise hierárquica, de forma que a hierarquia fornecida indicasse os sistemas mais atrativos sob o aspecto econômico.

7.3.4.2 Resultados da avaliação para torta de lodo de esgotos

A Tabela 7.14 reúne as informações obtidas com os especialistas através dos formulários de “Análise Econômica” e os valores médios da pontuação atribuída por eles nos formulários de “Análise Ambiental” para itens que possuem interface econômica. No caso desses itens, foi fornecida uma escala – Tabela 7.4, que traduzia em números os dados qualitativos para cada aspecto questionado.

Deve-se observar que no sistema A, a retirada da matéria orgânica e a moagem da escória foram indicadas pelos especialistas como pontos negativos numa abordagem econômica por representarem acréscimo de processos. Porém, como em um processo de sinterização para a produção de agregado leve, ocorre a retirada da matéria orgânica simultaneamente com a disponibilidade do poder calorífico, resultante da queima desta mesma matéria orgânica; isto contrapõe o aspecto econômico negativo do processo, e foi indicado no parâmetro de consumo de recursos como redução de combustível. Da mesma forma foi tratada a moagem da escória, resultante desta sinterização; se por um lado é um processo a ser implementado, por outro lado implica na redução do consumo de recursos, por exemplo de matéria-prima.

Tabela 7.14 Resumo da avaliação econômica.

PARÂMETROS	A	B	C
Pontos positivos	Transporte ↓ Consumo mat.pr. ↓	Consumo mat.pr. ↓	Energia ↓ Consumo mat.pr. ↓ Cons. combust. ↓
Pontos negativos	Tirar Mat.Org. Controle gases Moagem Escória	Secar resíduo Controle gases	Secar resíduo Controle gases
% de aproveitamento do resíduo	± 17%	± 30%	± 30%
Forma de comercializar o resíduo	Reciclador pagaria	Reciclador cobraria	Reciclador aceitaria
Investimentos em P&D	± R\$30.000	± R\$75.000	± R\$55.000
Consumo de recursos	Energia: + 3 Mat. Prima: -3 Combustível: -3	Energia: + 5 Mat. Prima: -3	Água: -3 Energia: + 3 Mat. Prima: -3 Combustível: -3
Geração de rejeitos	Emissões Combustão: +3 Transporte: -5 Poeira: +3	Emissões: +5 Efluentes: +3	Emissões: +5 Efluentes: +3
Distância de transporte	-3	0	0
Máquinas/ equipamentos	+3	+3	+3
Risco do negócio (%)	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado

Legenda:

A – Agregado leve para argamassas e concretos

B - Matéria-prima e energia para produção de cimento

C - Matéria-prima para cerâmica vermelha

Os valores apresentados como investimentos em pesquisa e desenvolvimento são certamente muito baixos, vide Tabela 7.14. Tratam-se de valores apenas referentes à escala de bancada, pois dado o caráter preliminar da entrevista, sem a definição dos processos envolvidos nos sistemas de reciclagem, ainda não havia como estimar valores para uma unidade piloto e muito menos para a implantação em escala industrial.

Comparando cada sistema de reciclagem dois a dois, conforme preceito da análise hierárquica, considerando todos os parâmetros, obteve-se o resultado apresentado na Tabela 7.15 para o desempenho econômico dos sistemas de reciclagem para tortas de lodo de esgoto analisados.

Tabela 7.15 Análise hierárquica da avaliação econômica.

SISTEMAS	A	B	C	Total da linha	Atratividade relativa
A	1	6	2	9,00	0,56
B	1/6	1	1/4	1,42	0,09
C	1/2	4	1	5,50	0,35
Total geral				15,92	1,00

Legenda:

A - Adição para argamassas e concreto

B - Matéria-prima e energia para produção de cimento

C - Matéria-prima para cerâmica vermelha

Escala:

Desempenho igual = 1

Desempenho levemente melhor = 2

Desempenho melhor = 4

Desempenho muito melhor = 6

Para as tortas de lodo de esgoto, conforme o critério mencionado, o sistema de reciclagem que apresentou a maior viabilidade econômica foi o sistema A, seguido pelo sistema C. O sistema de reciclagem B, repetindo o desempenho da análise de mercado, ficou novamente com a pior classificação, gerando a seguinte hierarquia quanto ao foco econômico:

1º) Sistema A

2º) Sistema C

3º) Sistema B.

Porém é prudente salientar, que a alternativa B não deve ser excluída. O valores indicados refletiram uma hierarquização de custos comparados entre os três sistemas analisados, porém uma análise econômica realizada pela indústria cimenteira poderia concluir que esta reciclagem é viável para o seu setor, pois os parâmetros por ela tomados seriam outros.

7.4 SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS POTENCIALMENTE SUSTENTÁVEIS

Nesta fase todos os resultados das avaliações de sustentabilidade dos sistemas de reciclagem são comparados através de análise hierárquica. Cria-se uma hierarquia cujo objetivo é propiciar a seleção daqueles sistemas mais sustentáveis. A Tabela 7.16 apresenta os resultados finais de todas as classificações dos sistemas de reciclagem avaliados para as tortas de lodo de esgoto.

Tabela 7.16 Resumo das avaliações dos sistemas de reciclagem.

CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO		
	1º	2º	3º
Ambiental	A	C	B
Saúde ocupacional	B e C	-	A
Mercado	C	A	B
Econômico	A	C	B

Legenda:

A – Agregado leve para argamassas e concretos

B - Matéria-prima e energia para produção de cimento

C - Matéria-prima para cerâmica vermelha

Os resultados apresentados na Tabela 7.16 acima fornecem a principal informação buscada através desta metodologia, que é a viabilidade de um estudo de reciclagem de tortas de lodo de esgoto em materiais de construção. A partir destes resultados as partes interessadas na reciclagem dos resíduos de tratamento de esgotos, como a Sabesp, pesquisadores e órgãos públicos, podem utilizar os critérios mais apropriados para cada período, região e quaisquer outros interesses específicos para criar uma hierarquia. Nestes critérios estarão envolvidos valores e interesses de cada parte atuante na vida do resíduo, e que cabem a estes atores adotar para a criação de uma análise hierárquica.

Puramente como exemplo de como isso pode ser feito, é apresentada a seguir uma hierarquia hipotética sugerida pelo autor, utilizando os seguintes pesos:

- para o fator econômico, objetivo de qualquer atividade empresarial, peso 4;
- para o fator ambiental, considerando que o objetivo básico da reciclagem é reduzir a agressão ao meio ambiente, peso 3;
- para o fator de mercado peso 2;
- e para o fator de saúde ocupacional, passível de controle dentro de uma empresa, através de equipamentos e medidas de proteção, peso 1.

Quanto a classificação apresentada na Tabela 7.16, atribuiu-se para a primeira colocação 3 pontos, para a segunda colocação 2 pontos, e para a terceira colocação 1 ponto. Executou-se então a seguinte montagem e operação matricial.

Critério	A	B	C	pesos			A	B	C
Amb.	3	1	2		3		9	3	6
Saúde	1	3	3		1		1	3	3
Merc.	2	1	3	X	2	=	4	2	6
Econ.	3	1	2		4		12	4	8

Total das colunas	26	12	23
Importância relativa	0,42	0,20	0,38

Assim pelo julgamento do autor, a hierarquia proposta para a reciclagem de torta de lodo de esgoto da ETE Barueri foi:

1º lugar: Sistema A – Agregado leve para argamassas e concretos;

2º lugar: Sistema C – Matéria-prima para cerâmica vermelha;

3º lugar: Sistema B – Matéria-prima e energia para produção de cimento.

7.5 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES

Devido a disponibilidade dos entrevistados, não foi possível discutir as tortas de lodo de todas as ETEs da RMSP, assim nesta etapa foi analisada somente a torta de lodo da ETE Barueri, porém como indicativo de viabilidade para pesquisa e desenvolvimento este resultado pode ser extensivo às demais.

Quanto à decisão do que pesquisar e desenvolver, é recomendável um estudo semelhante a este, particularizado para cada ETE, ratificando que para esta decisão a definição de graus de importância e estratégia devem partir da alta administração da empresa geradora do resíduo. A análise hierárquica pode ser mais precisa e refinada, tão melhores e maiores sejam os dados disponíveis para a alimentação do sistema de avaliação. Também pode ser enriquecida pela participação de maior número de profissionais consultados, bem como pela maior diversidade de suas formações.

No caso específico das tortas de lodo de esgotos, o ajuste da metodologia deve conter a inclusão dos riscos associados a substâncias tóxicas e à presença de patógenos.

Além disso, realizar análises econômica e de mercado ouvindo apenas os especialistas introduz o risco destas avaliações pouco refletirem indicadores econômicos e de mercado. Assim, a participação de profissionais das áreas econômica e de mercado na geração da listagem dos aspectos deve ser estendida para a fase de avaliação, juntamente com os especialistas das áreas de reciclagem.

Cabe destacar que as três alternativas – agregados leves, produtos de cerâmica vermelha e cimento Portland – tiveram indicativos de viabilidade, de tal forma que apesar da hierarquia estabelecida, todas as três alternativas de sistemas de reciclagem poderiam ser pesquisadas, uma vez que espera-se dispor de um conjunto de soluções para a disposição dos lodos de esgoto da RMSP.

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disposição dos lodos provenientes do tratamento de esgotos da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP – é um problema antigo. Para a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp – que é a geradora destes resíduos, a solução, ou o conjunto de soluções, deve pautar-se em três princípios:

- capacidade de atender a escala da geração destes resíduos;
- ser ambientalmente adequada e;
- implicar em redução dos custos da disposição atualmente praticada.

A sociedade, os órgãos públicos ambientais e o Estado por sua vez também esperam uma solução nestes moldes, cada uma deles com interesses próprios, porém validando estes três princípios.

À comunidade científica, pesquisadores e estudantes cabe auxiliar na busca desta solução, sendo que esta dissertação buscou contribuir sob este ponto de vista.

Neste trabalho foi constatado que as cinco Estações de Tratamento de Esgotos do Sistema Principal da RMSP são diferentes entre si, e principalmente que seus processos de tratamento da fase sólida não são os mesmos. As bacias de contribuição também tem características peculiares, o que causa distinção entre as quantidades e características físico-químicas dos lodos gerados. Esta condição sugere que a solução para a disposição dos lodos não precisa, e nem deve, ser a mesma para todas as ETEs. Além do mais, a diversificação como conceito gerencial é muito mais interessante, oferecendo à empresa maior flexibilidade no mercado, não só como estratégia para garantia da disposição perene das tortas, mas até mesmo com vistas a

considerar uma mudança conceitual sobre o resíduo, deixando de ser um problema para tornar-se uma linha adicional de negócios.

Os dados aqui apresentados mostram que para a RMSP os lançamentos de esgotos industriais, clandestinos ou não, limitam o uso agrícola. Além disto, a inexistência de mercado consumidor para este produto nas proximidades da RMSP é um fator importante a ser considerado.

A alternativa de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto como materiais de construção é muitas vezes descartada do elenco de alternativas viáveis por alguns profissionais da área de saneamento. O argumento para esta atitude é que se esta fosse uma boa alternativa, seria largamente usada nos Estados Unidos e países da Europa, e não apenas como atitudes isoladas, incipientes e até com alguns insucessos.

Entretanto é importante observar que nestes países a Indústria da Construção Civil tem influência econômica e metodologia de trabalho diferentes das praticadas no Brasil. Países desenvolvidos já possuem seu território construído no tocante a infraestrutura urbana e industrial. O Brasil é um país em desenvolvimento, logo indústrias de base como a da construção civil ocupam parte significativa do mercado, sem contar com o gigantesco déficit habitacional existente.

No Brasil, a cadeia da construção civil – chamada de *Construbusiness* – representa cerca de 18% do Produto Interno Bruto e emprega cerca de 15 milhões de pessoas (FIESP, 2003). Números como estes garantem, indiscutivelmente, demanda de materiais de construção capaz de incorporar percentual pequeno de resíduos em sua massa, porém equivalente à totalidade da geração de resíduos de tratamentos de esgoto. Além do mais, a metodologia brasileira de construção é baseada quase que integralmente em matérias-primas pétreas e minerais. Assim, agregados, cimentos, concretos, blocos cerâmicos e de concreto são materiais consumidos em grande volume e que podem permitir em seu processo de fabricação a incorporação de resíduos. Esta é uma realidade bem diferente daquela encontrada em países

desenvolvidos que trabalham com produtos como gesso e madeira, cuja incorporação de resíduos de tratamento de esgotos é descartada.

No Brasil, as estatísticas sobre consumo de materiais de construção civil são escassas, mesmo assim JOHN (2000) apresenta uma estimativa para agregados a partir de números da indústria cimenteira. Considerando-se 35 milhões de toneladas de cimento Portland produzidas por ano, e um traço médio 1:6, em massa, tem-se um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados na produção de concretos e argamassas, excetuando-se pavimentação e perdas.

A esta quantidade, deve ser acrescida as quantidades de matérias-primas extraídas para a fabricação do cimento e dos elementos cerâmicos, que conjuntamente com o consumo de energia nos processos de fabricação e transporte dão uma idéia do gigantismo deste setor, e conseqüentemente a potencial capacidade de absorção de resíduos em seus insumos básicos, justamente os agregados, aglomerantes e produtos de cerâmica vermelha.

A reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto deve contar ainda a seu favor com o fato destes resíduos não constituírem matéria inútil a ser confinada no processo de reciclagem apenas como forma de disposição final. Eles são resíduos portadores de características, as quais, se não melhorarem o produto, ou mesmo derem origem a uma nova linha de produtos, no mínimo entram como substituição de parte da matéria-prima e como combustível auxiliar, significando redução de custos no processo.

8.1 CONCLUSÕES

Em consonância com os objetivos desta pesquisa, a conclusão geral e mais importante foi a confirmação da viabilidade técnica, ambiental, ocupacional, econômica e de mercado das possibilidades de reciclagem das tortas de lodo de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo em processos industriais, referendando assim o prosseguimento de estudos, pesquisa e desenvolvimento para este fim.

De forma mais específica pode-se listar as seguintes conclusões:

- 1) o resíduo de maior importância devido ao grande volume gerado são as tortas de lodo, porém atenção também deve ser dada aos péletes, biogás, areia, material peneirado e gradeado;
- 2) os lodos não podem ser considerados como um resíduo único, eles constituem uma família de lodos diferentes de ETE para ETE, e conseqüentemente cada uma das cinco ETEs da RMSP deve ser tratada como única em um processo de reciclagem;
- 3) em linhas gerais, metade da massa sólida das tortas analisadas é inorgânica e a outra metade orgânica;
- 4) a parte inorgânica é formada basicamente de quartzo e compostos argilosos, além de calcita nos lodos das ETEs que usam cal como condicionador;
- 5) a parte orgânica pode ser aproveitada como fonte de energia complementar em processos industriais;
- 6) a entrada, clandestina ou não, de efluentes industriais implica em variabilidade de componentes e concentrações de poluentes orgânicos e inorgânicos;

- 7) uso das ferramentas de análise ambiental contribui para modificar a forma de abordagem da problemática dos resíduos de saneamento pelo próprio setor de Saneamento Básico. Este setor passa a ter sua dimensão ampliada para Saneamento Ambiental, deixando de ver seus resíduos como algo a ser simplesmente descartado, para adotar uma postura coerente com os princípios de desenvolvimento sustentável;
- 8) uma vez que um conjunto de soluções para a disposição dos lodos é recomendável estrategicamente para a empresa de saneamento, e como as três alternativas de uso na fabricação de materiais de construção – agregado leve, produtos de cerâmica vermelha e cimento Portland – mostraram-se viáveis, o processo de Pesquisa & Desenvolvimento pode prosseguir para todas as três alternativas.

8.2 PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS

A partir de observações ao longo da realização deste trabalho, algumas questões foram surgindo e são listadas a seguir como propostas para novos estudos:

- 1) estudo mais detalhado das características físicas, químicas e mineralógicas de cada resíduo em cada ETE, bem como de sua variabilidade;
- 2) averiguação da utilização da areia removida nas ETEs para composição de areia normal ABNT, após algum tratamento;
- 3) busca de mais setores alternativos para uso dos resíduos de tratamento de esgoto, bem como uma análise comparativa englobando todas as alternativas, inclusive a disposição agrícola, para cada ETE estudada;

- 4) prosseguimento em pesquisa e desenvolvimento para as alternativas listadas como viáveis;
- 5) melhor avaliação do comportamento dos lodos de esgoto diante de processos térmicos, inclusive quanto a emissões atmosféricas;
- 6) melhor avaliação do comportamento dos lodos de esgoto face a lixiviação.

ANEXO A

DADOS OPERACIONAIS DAS ETES

Tabela 1 Dados operacionais da ETE ABC.

Período	Vazão (m ³ /s)	Material Removido		Consumo de Produtos Químicos		Geração de Subprodutos		SST (mg/L)	
		Gradeado (kg/dia)	Areia (kg/dia)	CaO (kg/dia)	FeCl ₃ (kg/dia)	Lodo (t /dia)	Gás (m ³ /dia)	Esgoto Bruto	Esgoto Tratado
jul./01	1,34	290	540	1.107	1.253	19	2.047	151	12
ago./01	1,23	390	0	1.171	1.152	20	1.940	165	11
set./01	1,33	300	0	911	884	15	1.805	162	12
out./01	1,42	390	0	1.125	807	16	2.128	126	12
nov./01	1,22	400	1050	431	422	5	2.876	159	9
dez./01*	0,65	0	0	765	668	15	761	141	11
jan./02	1,50	190	1020	2.018	1.230	27	789	129	10
fev./02	1,50	320	0	1.656	1.075	22	1.189	203	13
mar./02	1,55	580	0	1.055	1.124	17	906	184	9
abr./02	1,48	700	0	1.714	1.300	21	989	202	11
maio/02	1,50	290	0	811	593	11	1.577	162	13
jun./02	1,48	200	1400	1.287	735	16	1.584	231	11
Média	1,41	338	334	1.171	937	17	1.549	168	11

* Devido à recuperação e limpeza do Interceptor Meninos no mês de dez./01 houve paralisação do bombeamento do Rio Tamanduateí para a estação, reduzindo a vazão tratada regularmente na ETE. Os dados de dez./01 não foram considerados no cálculo das médias anuais.

Fonte: Sabesp (2001), adaptada.

Tabela 2 Dados operacionais da ETE Barueri.

Período	Vazão (m ³ /s)	Material Removido		Consumo de Produtos Químicos		Geração de Subprodutos		SST (mg/L)	
		Gradeado (kg/dia)	Areia (kg/dia)	Polímero (kg/dia)	FeCl ₃ (kg/dia)	Lodo (t /dia)	Gás (m ³ /dia)	Esgoto Bruto	Esgoto Tratado
jul./01	6,46	397	516	208	-	188	16.484	195	22
ago./01	6,49	542	0	229	-	189	20.433	206	25
set./01	5,97	3.300	553	231	-	188	18.832	178	15
out./01	5,76	677	0	245	-	227	24.778	175	23
nov./01	6,58	750	2.567	293	-	177	23.432	167	14
dez./01	6,99	516	710	348	3.610	259	24.855	207	20
jan./02	7,04	1.194	742	347	2.470	308	23.133	155	14
fev./02	6,43	1.143	3.107	269	2.245	171	26.033	200	17
mar./02	6,65	1.177	0	353	4.077	240	25.548	152	15
abr./02	6,42	1.117	1.800	313	3.720	241	24.978	172	13
maio/02	6,57	781	1.935	316	3.273	225	29.826	164	17
jun./02	6,31	650	3.200	394	5.126	293	24.356	290	15
Média	6,47	1.020	1.261	295	3.503	226	23.557	188	17

Fonte: Sabesp (2001), adaptada.

Tabela 3 Dados operacionais da ETE Parque Novo Mundo.

Período	Vazão (m ³ /s)	Material removido			Consumo de Produtos Químicos		Geração de Subproduto	SST (mg/L)	
		Gradeado (kg/dia)	Areia (kg/dia)	Peneirado (kg/dia)	CaO (kg/dia)	FeCl ₃ (kg/dia)		Esgoto Bruto	Esgoto Tratado
jul./01	1,09	71	0	1.029	4.295	1.654	9	346	17
ago./01	1,10	0	998	1.389	5.669	2.681	19	241	17
set./01	1,12	0	0	1.550	-	-	-	280	25
out./01	1,34	0	0	1.699	-	-	-	114	31
nov./01	1,36	0	0	1.258	5.644	2.169	28	243	35
dez./01	1,44	57	2.413	1.305	6.621	2.764	41	238	24
jan./02	1,29	0	5.021	1.055	6.392	2.402	57	109	11
fev./02	1,49	0	1.867	1.609	7.656	3.045	67	169	32
mar./02	1,46	85	526	954	5.638	2.198	49	230	22
abr./02	1,43	78	89	1.101	4.445	1.819	38	201	19
maio/02	1,37	35	0	1.308	5.557	2.275	48	159	20
jun./02	1,40	0	937	2.268	0	0	0	210	32
Média	1,32	27	988	1.377	5.192	2.101	36	212	24

Obs.: 1. O início de pré-operação da fase sólida foi em 22/01/01.

2. O sistema de condicionamento e desidratação do lodo apresenta-se instável, não sendo possível a obtenção de dados significativos com relação ao consumo de produtos químicos e produção de lodo desidratado.

3. Durante o mês de junho não houve produção de lodo devido a manutenção na fase sólida.

Fonte: Sabesp (2001), adaptada.

Tabela 4 Dados operacionais da ETE São Miguel.

Período	Vazão (m ³ /s)	Material Removido		Consumo de Produto Químico	Geração de Subproduto	SST (mg/L)	
		Gradeado (kg/dia)	Areia (kg/dia)	Polímero (kg/dia)	Lodo (t/dia)	Esgoto Bruto	Esgoto Tratado
jul./01	0,48	245	1.998	-	-	746	16
ago./01	0,42	245	0	-	-	338	22
set./01	0,46	204	0	-	-	447	18
out./01	0,56	329	0	-	-	346	18
nov./01	0,74	425	8.480	-	-	203	14
dez./01	0,83	482	0	-	-	191	52
jan./02	0,62	161	0	3	6	315	13
fev./02	0,71	160	2.274	4	10	224	21
mar./02	0,61	200	0	4	9	479	11
abr./02	0,52	82	2.813	4	8	270	6
maio/02	0,59	85	0	3	7	266	14
jun./02	0,55	92	1.589	5	9	500	10
Média	0,59	226	1.430	4	8	360	18

Obs.: Início de pré-operação da fase sólida em jan/02.

Fonte: Sabesp (2001), adaptada.

Tabela 5 Dados operacionais da ETE Suzano.

Período	Vazão (m ³ /s)	Material Removido		Consumo de Produtos Químicos		Geração de Subprodutos		SST (mg/L)	
		Gradeado (kg/dia)	Areia (kg/dia)	CaO (kg/dia)	FeCl ₃ (kg/dia)	Lodo (t /dia)	Gás (m ³ /dia)	Esgoto Bruto	Esgoto Tratado
jul./01	0,52	119	2.627	2.947	1.465	64	2.575	458	25
ago./01	0,60	239	1.810	1.989	1.002	33	4.291	436	18
set./01	0,62	216	1.690	-	-	-	755	415	23
out./01	0,76	223	2.153	1.610	797	27	3.524	421	22
nov./01	0,71	259	3.115	2.575	1.286	47	3.069	303	18
dez./01	0,83	195	4.597	2.110	1.054	38	2.038	257	24
jan./02	0,92	326	5.652	2.839	1.421	54	3.140	226	20
fev./02	0,76	129	4.238	2.928	1.418	51	4.609	249	13
mar./02	0,83	161	8.216	2.417	1.315	45	3.579	214	8
abr./02	0,69	54	2.304	2.121	873	27	3.288	355	11
maio/02	0,77	46	1.650	1.302	618	22	3.780	314	10
jun./02	0,53	73	479	1.954	950	33	1.892	327	18
Média	0,71	170	3.211	2.254	1.109	40	3.045	331	18

Obs.: Não houve produção de lodo desidratado em set/01 devido a manutenção do filtro-prensa, e conseqüentemente não houve consumo de produtos químicos neste período.
Fonte: Sabesp (2001), adaptada.

Tabela 6 Caracterização dos metais nas tortas de lodo da ETE ABC.

Parâmetros	Cádmio (mg/kg)	Chumbo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Manganês (mg/kg)	Ferro (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Prata (mg/kg)	Zinco (mg/kg)	Molibdênio (mg/kg)	Cromo Total (mg/kg)
CETESB P 4.230 ago/99	85	840	4.300	-	-	420	-	7.500	75	-
out/01	11	253	978	1.085	56.750	207	27	3.000	-	655
nov/01	12	178	970	1.046	45.000	226	29	2.800	-	693
dez/01	13	275	972	1.164	49.280	235	27	2.880	-	344
jan/02	9	219	958	1.147	48.112	250	33	3.171	-	519
fev/02	14	288	994	802	51.500	215	36	2.270	-	464
mar/02	14	176	839	1.054	56.200	184	29	2.440	-	463
abr/02	12	184	745	1.503	53.600	178	26	2.560	26	493
mai/02	12	260	1.059	1.513	46.350	206	28	3.060	7	521
jun/02	14	256	968	1.590	57.300	190	30	3.010	18	602
jul/02	13	262	895	1.132	52.400	181	26	3.176	17	602
ago/02	19	264	925	1.484	58.400	186	30	3.070	12	631
set/02	19	284	1003	698	46.300	186	28,8	2.880	12	652
Média	14	242	942	1.185	51.766	204	29	2.860	15	553
Desv. Padrão	3	41	83	286	4.743	24	3	293	7	103
Coef. Var. (%)	5,8	11,3	4,1	10,9	8,6	9,9	9,8	5,4	2,3	5,4

Obs.: Análises realizadas pelos laboratórios da Sabesp.

Tabela 7 Caracterização dos metais nas tortas de lodo da ETE Barueri.

Parâmetros	Cádmio (mg/kg)	Chumbo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Manganês (mg/kg)	Ferro (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Prata (mg/kg)	Zinco (mg/kg)	Molibdênio (mg/kg)	Cromo Total (mg/kg)
CETESB P 4.230 ago/99	85	840	4.300	-	-	420	-	7.500	75	-
Out/01	10,8	150	579	227	38.992	335	65	2.230	-	580
Nov/01	10,7	173	631	227	33.755	398	75	2.446	-	867
Dez/01	11,7	177	549	236	39.287	379	67	2.202	-	490
Jan/02	8,6	169	516	220	25.176	330	66	2.154	-	458
Fev/02	14,7	211	666	249	37.367	284	66	2.090	-	447
Mar/02	14,1	111	479	262	24.900	232	58	1.999	-	497
Abr/02	15,6	131	516	321	32.883	263	56	2.002	16	580
Mai/02	15,5	171	590	283	32.789	311	56	2.192	15	662
Jun/02	17,2	165	614	262	32.300	319	57	2.226	14	771
Jul/02	13,5	154	549	228	37.116	325	71	2.443	16	725
Ago/02	15,3	189	535	261	27.107	275	59	2.783	13	680
Set/02	10,9	165	574	248	30.440	259	54	3.402	12	665
Média	13,2	164	567	252	32.676	309	63	2.347	14	619
Desv. Padrão	2,6	26	53	29	5.040	49	7	398	2	133
Coef. Var. (%)	5,1	6,3	10,6	8,7	6,5	6,3	9,3	5,9	8,8	4,7

Obs.: Análises realizadas pelos laboratórios da Sabesp.

Tabela 8 Caracterização dos metais nas tortas de lodo da ETE São Miguel.

Parâmetros	Cádmio (mg/kg)	Chumbo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Manganês (mg/kg)	Ferro (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Prata (mg/kg)	Zinco (mg/kg)	Molibdênio (mg/kg)	Cromo Total (mg/kg)
CETESB P 4.230 ago/99	85	840	4.300	-	-	420	-	7.500	75	-
out/01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov/01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dez/01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
jan/02	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
fev/02	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Mar/02	3,5	72	156	159	31.966	593	10,1	554	3,2	227
abr/02	2,8	61	149	178	48.657	426	3,8	622	0,5	241
Mai/02	2,5	59	102	151	23.594	364	7,0	408	4,0	85
jun/02	3,2	53	84	158	22.137	260	8,0	353	4,7	76
jul/02	1,8	24	67	130	24.684	261	0,6	336	21,4	56
Ago/02	2,3	29	61	114	25.194	268	7,0	378	5,6	46
set/02	2,7	27	69	163	26.579	357	0,3	363	0,5	55
Média	2,7	46	98	150	28.973	361	5,2	431	3,0	112
Desv. Padrão	0,6	19	39	21	9.224	120	3,8	112	2,0	84
Coef. Var. (%)	4,9	2,4	2,5	7,0	3,1	3,0	1,4	3,9	1,4	1,3

Obs.: Análises realizadas pelos laboratórios da Sabesp.

Tabela 9 Caracterização dos metais nas tortas de lodo da ETE Suzano.

Parâmetros	Cádmio (mg/kg)	Chumbo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	Manganês (mg/kg)	Ferro (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Prata (mg/kg)	Zinco (mg/kg)	Molibdênio (mg/kg)	Cromo Total (mg/kg)
CETESB P 4.230 ago/99	85	840	4.300	-	-	420	-	7.500	75	-
out/01	27	229	781	-	36.694	487	-	7.108	249	879
nov/01	24	189	621	1.909	46.253	555	-	7.595	-	981
dez/01	29	313	726	966	42.192	-	-	5.517	-	857
jan/02	17	229	695	1.267	36.713	877	-	3.693	-	1.628
fev/02	13	310	711	1.074	46.408	677	-	3.238	-	1.542
mar/02	15	244	838	-	40.174	317	-	3.203	48	1.707
abr/02	10	185	727	631	41.449	355	-	2.215	59	2.367
mai/02	3	213	577	567	33.324	191	-	2.002	24	639
jun/02	7	313	599	583	33.859	268	-	-	21	831
jul/02	8	341	690	604	45.299	516	-	4.218	25	650
ago/02	8	341	719	592	40.748	386	-	3.173	23	550
set/02	7	410	702	632	43.855	533	-	2.964	48	852
Média	14	276	699	883	40.581	469	-	4.084	62	1.124
Desv. Padrão	9	71	73	437	4.578	196	-	1.874	77	557
Coef. Var. (%)	1,6	3,9	9,5	2,0	8,9	2,4	-	2,2	0,8	2,0

Obs.: Análises realizadas pelos laboratórios da Sabesp.

ANEXO B

DOSSIÊ DO RESÍDUO

INFORMAÇÕES SOBRE O RESÍDUO

1. Nome do resíduo

T E B

2. Tipo de resíduo

- ☐ Orgânico
☐ Mineral
☐ Metálico
☒ Outro: ***Orgânico e Mineral***

3. Estado do resíduo

- ☐ Sólido
☐ Líquido
☒ Semi-sólido (pastoso) – Fração sólida: ***40*** %

4. Classe do resíduo (de acordo com a NBR 10.004)

- ☐ Classe I (Perigoso) – Especificar código de identificação: _____
☒ Classe II (Não Inerte)
☐ Classe III (Inerte)
☐ Ainda não classificado

5. Solubilidade do resíduo

- ☐ Solúvel
☐ Não solúvel
☒ Ainda não determinada

6. Densidade do resíduo

- ☐ Disponível – Especificar: _____
☒ Não disponível:

☐ Flutua na água
☒ Afunda na água

APENAS PARA A FRAÇÃO SÓLIDA

7. Forma do resíduo

- ☒ Granular
☐ Fibrosa
☐ Laminar
☐ Fios
☐ Outra _____

8. Superfície do resíduo

- ☐ Lisa
☐ Ondulada
☐ Rugosa
☐ Com cavidades
☐ Sem cavidades

9. Resistência do resíduo

- ☐ Disponível – Especificar: _____
☒ Não disponível:

☒ Desagregável manualmente
☐ Não desagregável manualmente

10. Granulometria do resíduo

- ☐ Não disponível
☐ Disponível – Especificar:

_____ % superior a 4,8 mm (# 4)
 _____ % superior a 0,15 mm (# 100)
 _____ % inferior a 0,0075 mm (# 200)

DADOS SOBRE O SISTEMA DE GERAÇÃO DO RESÍDUO

1. Tipo de indústria:

X X X

2. Processo onde o resíduo é gerado¹

X X X

3. Presença de pontos críticos no sistema de geração²

☐ Uso de materiais radioativos

☒ Uso de materiais patogênicos

☒ Uso de outros contaminantes:

☐ Ácidos/bases

☒ Óleos/graxas

☐ Solventes

☒ Metais pesados

☐ Outros _____

4. Média anual gerada (local)

82,5 mil toneladas

5. Influência da sazonalidade na geração (quantitativa)

☒ Insignificante

☐ Extremamente significativa

Meses de menor geração: _____

Média mensal: _____

Meses de maior geração: _____

Média mensal: _____

6. Variabilidade qualitativa na geração³

☐ Nula ou insignificante

☒ Significativa*

☐ Extremamente significativa*⁴

* Causas: *Tipo e teor de metais*

7. Forma de gerenciamento atual do resíduo

☐ Armazenamento

☒ Disposição em aterro

☐ Tratamento

☐ Reúso

☐ Reciclagem

☐ Outro: _____

8. Possibilidade de contaminação do resíduo durante o gerenciamento:

☐ Nula ou insignificante

☒ Significativa*

* Causas: *Patogenicidade e toxicidade*

¹ Especificar o processo dentro da atividade industrial onde o resíduo é gerado.

² Este item deve avaliar a possibilidade do resíduo ser contaminado com matérias-primas usadas no processo, e deve ser preenchido mesmo se o resíduo não for perigoso segundo a NBR 10.004.

³ Avaliar se a composição do resíduo pode variar em função dos tipos de matérias-primas usadas e de suas quantidades (por exemplo, se o sistema produz diferentes artigos durante o ano).

⁴ Neste caso, deve ser indicada a necessidade de um estudo detalhado de variabilidade na etapa de P&D.

9. Custo médio de gerenciamento do resíduo

- 1ª Forma mais usada: *Aterro* - Custo: *R\$ 80,00 / t (incluindo transporte)*
- 2ª Forma mais usada: _____ - Custo: _____
- 3ª Forma mais usada: _____ - Custo: _____

10. Quantidade de resíduo armazenado/estocado

No município: _____

Na região: _____

No Estado: _____

No País: _____

11. Interesse do gerador pela reciclagem do resíduo

- ☐ Nulo ou insignificante
- ☐ Significativo
- ☐ Extremamente significativo

12. Tendência de mudanças no sistema produtivo gerador do resíduo

- ☐ Nula ou insignificante
- ☒ Significativa
- ☐ Extremamente significativa

Tabela 1.1 Índices físicos do resíduo.

Índices físicos	unidade	Resíduo
Massa específica	kg/m ³	1.923
Massa específica aparente	kg/m ³	1.032
Absorção de água	%	
Teor de matéria orgânica (440°C)	%	51
Teor de umidade base úmida	%	75
Composição granulométrica		
pedregulho 5 mm ≤ Ø < 76 mm	%	-
areia grossa 2 mm ≤ Ø < 5 mm	%	-
areia média 0,4 mm ≤ Ø < 2 mm	%	-
areia fina 0,05 mm ≤ Ø < 0,4 mm	%	13
silte 0,005 mm ≤ Ø < 0,05 mm	%	47
argila Ø < 0,005 mm	%	40

Obs.: Ensaios realizados no IPT.

Tabela 1.2 Análise química completa do resíduo.

Material amostrado		Resíduo
Composição Química		
Na ₂ O	%	0,49
MgO	%	1,20
Al ₂ O ₃	%	13,30
SiO ₂	%	26,50
P ₂ O ₅	%	10,40
SO ₃	%	11,50
Cl	%	0,34
K ₂ O	%	1,07
CaO	%	11,60
TiO ₂	%	1,81
Cr ₂ O ₃	%	0,30
MnO	%	0,12
Fe ₂ O ₃	%	19,20
NiO	%	0,13
CuO	%	0,36
ZnO	%	0,97
Br	%	<<
Rb ₂ O	%	0,01
SrO	%	0,04
Y ₂ O ₃	%	0,01
ZrO ₂	%	0,08
Nb ₂ O ₅	%	<<
SnO ₂	%	0,11
BaO	%	0,16
WO ₅	%	0,06
PbO	%	0,06
Umidade	%	72,27
Perda ao Fogo	%	82,77

Obs.: Método de análise: semiquantitativa, por fluorescência de raios X.

Análise semiquantitativa sem padrões de Flúor a Urânio.

Resultados em % de óxidos, base calcinada a 1.050°C, normalizados a 100%.

<< = traços (menor que 0,01%)

Tabela 1.3 Análise química complementar e poder calorífico do resíduo.

Material amostrado			Resíduo	Resíduo	Resíduo	Resíduo	Resíduo	Resíduo
Composição Química								
Enxofre	S	%	0,30	1,20	-	1,30	-	-
Carbono	C	%	21,40	29,40	-	24,73	-	-
Hidrogênio	H	%	3,50	4,80	-	4,36	-	-
Nitrogênio	N	%	2,10	3,20	-	2,90	-	-
Poder calorífico superior	PCS	MJ/kg	7,70	13,00	1,02	3,99	-	-
Poder calorífico inferior	PCI	MJ/kg	6,90	12,00	ND	3,07	12,56	13,95

Tabela 1.4 Resultados da análise do resíduo pela NBR 10004/96.

Parâmetro	Lixiviado		Solubilizado		Amostra bruta	
	Resultado (mg/l)	Valor Listagem 7 (mg/l)	Resultado (mg/l)	Valor Listagem 8 (mg/l)	Resultado (mg/kg)	Valor Listagens 9 e 10 (mg/kg)
Alumínio (Al)			0,14	0,2		
Arsênio (As)	< LQ	5,0	< LQ	0,05	< LQ	1000
Bário (Ba)	1,43	100	0,04	1,0		
Berílio (Be)					< LQ	100
Cádmio (Cd)	< LQ	0,5	< LQ	0,005		
Chumbo (Pb)	0,08	5,0	< LQ	0,05	149,0	1000
Cianeto (CN)			0,10	0,1	< LQ	1000
Cloreto (Cl)			426,9	250		
Cobre (Cu)			< LQ	1,0		
Cromo Total (Cr)	< LQ	5,0	< LQ	0,05		
Cromo VI (Cr)					< LQ	100
Dureza (em CaCO ₃)			3760	500		
Ferro (Fe)			20,7	0,3		
Fluoreto (F)	0,09	150	0,27	1,5		
Índice de Fenóis			1,18	0,001	4,7	10
Manganês (Mn)			0,32	0,1		
Mercúrio (Hg)	< LQ	0,1	< LQ	0,001	< LQ	100
Nitrato (como N)			< LQ	10		
Prato (Ag)	< LQ	5,0	< LQ	0,05		
Selênio (Se)	< LQ	1,0	< LQ	0,01	< LQ	100
Sódio (Na)			32,2	200		
Sulfato (SO ₄)			19,3	400		
Surfactantes			0,07	0,2		
Vanádio (V)					44,3	1000
Zinco (Zn)			1,65	5,0		

Obs.:1) Para análise de lixiviação o pH é ajustado em $5,0 \pm 0,2$ através da adição de ácido acético.

2) O pH medido no ensaio de solubilização foi 6,89.

3) LQ = limite de quantificação.

Tabela 1.5 Parâmetros complementares na massa bruta do resíduo.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Cádmio	mg Cd/kg	8,58
Cobre	mg Cu/kg	536,5
Cromo Total	mg Cr/kg	446,0
Fósforo	mg P/l	5369,1
Molibdênio	mg Mo/kg	7,26
Níquel	mg Ni/kg	239,8
Nitrato	mg N/kg	7,98
Nitrito	mg N/kg	< LQ
Nitrogênio Total	mg N/kg	23626,5
Nitrogênio Amoniacal	mg N/kg	17,62
Potássio	mg K/kg	1457,0
Sódio	mg Na/kg	306,4
Zinco	mg Zn/kg	2228,0
TOC	%	25,33
<i>Coliformes fecais</i>	NMP/100 ml	< 0.03
<i>Salmonella</i>	NMP/100 ml	Negativa

Obs.: 1) LQ = limite de quantificação
 2) NMP = número mais provável
 3) pH = 6,60

DRX TEB

ANEXO C

FORMULÁRIOS DAS ENTREVISTAS

ESPECIALISTA A

INTERESSE PELO RESÍDUO – TEB

Especialista: A	Área: Agregados e aglomerantes
Local: EPUSP – Construção Civil	Data: 22 / 04 / 2003

USOS POSSÍVEIS NA ÁREA	APROVEITAMENTO ¹	FRAÇÃO DE INTERESSE
1. Agregado Leve (após calcinação)	100 %	Insolúvel em ácido
2. Agregado miúdo (após lavagem)	± 17 %	Insolúvel em água
3.		
4.		
5.		
6.		

CONSIDERAÇÕES

ANÁLISES NECESSÁRIAS:

- Aplicação 1: Analisar interferência do fosfato e do sulfato no desempenho.
- Aplicação 2: (a) Identificar em que forma o SO_4^{2-} e o PO_4^{3-} estão combinados; (b) granulometria à úmido do material; (c) análise de imagem; (d) forma do grão.

PONTOS CRÍTICOS:

- Aplicação 1: Quantidade elevada de enxofre (geração de gases SO_2) – necessidade de controle de emissões.

¹ Informar a % aproximada do resíduo que pode ser reciclada no uso indicado.

ESPECIALISTA B

INTERESSE PELO RESÍDUO – TEB

Especialista: B	Área: Aglomerantes (cimenteiras)
Local: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland)	Data: 23 / 04 / 2003

USOS POSSÍVEIS NA ÁREA	APROVEITAMENTO ²	FRAÇÃO DE INTERESSE
1. Co-processamento em fornos de cimento.	± 30 %	Fração sólida.
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

ENSAIOS ADICIONAIS A SEREM DESENVOLVIDOS ³
1. Confirmar ausência de patógenos.
2. Ensaios de caracterização específicos para co-processamento.
3.
4.
5.
6.

² Informar a % aproximada do resíduo que pode ser reciclada no uso indicado.

³ Ensaios / testes a serem efetuados para comprovar se o resíduo realmente pode ser usado na área do especialista.

ANÁLISE TÉCNICA

USO: Co-processamento em fornos de cimento.

PONTOS POSITIVOS	I	V	OBS.
1. Presença sílica, alumínio e ferro.	3	1	
2. Presença de matéria orgânica (energia).	1	1	
3.			
4.			
5.			
6.			

I = importância para o produto final:

1: pouco importante
3: importância média
5: muito importante

V = vantagem sobre o convencional:

1: praticamente nenhuma
3: pequena vantagem
5: grande vantagem

PONTOS NEGATIVOS	G	PC	OBS.
1. Quantidade elevada de água (encarece transporte).	5	5	Cimenteiras só receberiam resíduo seco.
2. Poder calorífico baixo.	3	1	
3. Quantidade elevada de enxofre e álcalis.	5	5	Pode-se corrigir na dosagem.
4.			
5.			
6.			

G = gravidade:

1: pequena
3: média
5: alta

PC = potencial problema ser controlado (técnica/e):

1: praticamente nenhum
3: médio
5: elevado

ANÁLISE AMBIENTAL

MUDANÇAS NO PROCESSO ATUAL	S
Consumo de água	0
Consumo de energia	5*
Consumo de combustível	0
Consumo de matéria-prima	-3
Consumo de mão-de-obra	0
Distâncias de transporte	0
Geração de emissões	3**
Geração de efluentes	5***
Geração de resíduos	0
Necessidade de novas máquinas/equipamentos	3
Possibilidade de reúso do produto após vida útil	0
Reciclabilidade do produto após vida útil	0
Periculosidade do resíduo gerado após vida útil	0

⇒

S = situação:

-5: diminui muito
-3: diminui
0: praticamente igual
3: aumenta
5: aumenta muito

PONTOS POSITIVOS (foco no processo de reciclagem e não no resíduo)	I	OBS.
1.		
2.		
3.		
4.		
5.

I = importância atribuída:

1: baixa
3: média
5: alta

PONTOS NEGATIVOS	I	OBS.
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

* Considerando a energia que o gerador teria de usar para secar o resíduo.

** Emissões no aquecimento do resíduo (pode liberar patógenos) e gases de enxofre no co-processamento.

*** Geração de efluentes na secagem do lodo (com matéria orgânica e com risco por patógenos).

Máquinas: tratores para revolver o lodo ou fornos / equipamentos de secagem.

ANÁLISE OCUPACIONAL

Preencher apenas para as novas atividades ou processos necessários à reciclagem (independente de onde será feita: no gerador ou no reciclador).

OCORRÊNCIA DE PERIGOS

	NOVOS PROCESSOS OU ATIVIDADES	Ruídos	Vibrações	Frio	Calor	Esforço físico intenso	Radiações não-ionizantes ⁴	Radiações ionizantes (α e β)	Radiações ionizantes (γ e X)	Substâncias explosivas/inflamáveis	Substâncias insalubres (especificar substâncias) ⁵
1	Secagem do lodo				X						Emissões com patógenos
2											
3											
4											
5											
	TOTAL										

⁴ Raio laser, infra-vermelho, ultra-violeta, microondas.

⁵ Poeiras minerais (asbestos, manganês e compostos, sílica cristalizada), arsênio, carvão, chumbo, cromo, fósforo, hidrocarbonetos, mercúrio, silicatos, benzeno, agentes biológicos, etc.

ANÁLISE DE MERCADO

A) CONCORRÊNCIA COM OUTROS PRODUTOS

1. Oferta de produtos concorrentes

- ☒ (1) a concorrência é extremamente significativa
- ☐ (2) a concorrência é significativa
- ☐ (5) não existem concorrentes

2. Tendência de novos produtos no mercado (curto a médio prazo)

- ☒ (1) provável
- ☐ (3) improvável
- ☐ (5) altamente improvável

B) INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

3. Vantagens tecnológicas do produto reciclado sobre os concorrentes

- ☒ (1) vantagens inexistentes ou insignificantes
- ☐ (3) vantagens significativas: _____
- ☐ (5) vantagens extremamente significativas: _____

4. Capacidade do consumidor em identificar vantagens tecnológicas

- ☐ (1) potencial baixo (ex.: consumidor não é profissional da área)
- ☐ (3) potencial médio (ex.: consumidor é profissional da área)
- ☐ (5) potencial alto (ex.: consumidor é outra indústria)

NÃO AVALIADO

5. Desenvolvimento tecnológico do mercado

- ☒ (1) muito alto
- ☐ (3) médio
- ☐ (5) muito baixo

C) INCENTIVOS AOS PRODUTOS/SISTEMAS DE RECICLAGEM

6. Incentivos fiscais

- ☒ (0) incentivos inexistentes
- ☐ (1) existem poucos incentivos
- ☐ (5) existem vários incentivos

7. Incentivos legais

- ☒ (0) incentivos inexistentes
- ☐ (1) existem poucos incentivos
- ☐ (5) existem vários incentivos

D) DEMANDA PARA O PRODUTO RECICLADO**8. Necessidade de produtos com as características técnicas do reciclado**

- ☒ (0) necessidade inexistente
- ☐ (1) existe a necessidade, já satisfeita por produtos convencionais
- ☐ (5) existe a necessidade, não satisfeita por outros produtos

9. Valorização dos “produtos verdes” pelos consumidores

- ☒ (1) praticamente insignificante ou inexistente
- ☐ (3) significativa
- ☐ (5) extremamente significativa

E) ASPECTOS DO SISTEMA PRODUTIVO**10. Interesse industrial (indústria recicladora) na reciclagem do resíduo**

- ☒ (1) praticamente insignificante ou inexistente
- ☐ (3) significativo
- ☐ (5) extremamente significativo

11. Escala produtiva do sistema de reciclagem

- ☐ (1) pequena escala – praticamente manual
- ☐ (3) média escala
- ☒ (5) larga escala

ANÁLISE ECONÔMICA

PONTOS POSITIVOS	BP	OBS.
1. Redução do consumo de matéria-prima e energia.*	1	O correto seria o termo “pouco significativo”.
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

BP = benefício potencial sobre o custo final:

- 1: significativo
3: muito significativo
5: extremamente significativo

PONTOS NEGATIVOS	IC	AG	OBS.
1. Quantidade de energia necessária para secar o material.	5	S	
2. Cuidados com a liberação de gases de enxofre.	3	N	
3.			
4.			
5.			
6.			

IC = impacto no custo final do produto:

- 1: significativo
3: muito significativo
5: extremamente significativo

AG = custo pode ser assumido pelo gerador:

- S: sim
N: não

RECICLADOR: () PAGARIA PELO RESÍDUO (X) COBRARIA PELO “SERVIÇO” () “ACEITARIA” O RESÍDUO

INVESTIMENTOS EM P&D: R\$ 100.000,00

RISCO DO NEGÓCIO

%

* Pelo poder calorífico do resíduo, a quantidade de energia economizada na produção de cimento seria insignificante em relação à necessária para secar o resíduo.

ESPECIALISTA C

INTERESSE PELO RESÍDUO – TEB

Especialista: C	Área: Materiais para pavimentação
Local: EPUSP – Engenharia de Transportes	Data: 23 / 04 / 2003

USOS POSSÍVEIS NA ÁREA	APROVEITAMENTO ⁶	FRAÇÃO DE INTERESSE
1.		
2.		
3.	<p style="text-align: center;"><i>Nenhuma aplicação possível.</i></p> <p style="text-align: center;"><i>O uso em pavimentação seria complicado por ser orgânico, fino e com baixa densidade, conjunto que produz um material muito plástico e instável.</i></p>	
4.		
5.		
6.		

ENSAIOS ADICIONAIS A SEREM DESENVOLVIDOS ⁷		
1.		
2.		
3.	<p style="text-align: center;"><i>Sugestão do especialista: avaliar potencial de uso em recuperação de solo (áreas de corte, aterro e mineração).</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Necessidade de consultar especialista no assunto: geólogo, biólogo, agrônomo.</i></p>	
4.		
5.		
6.		

⁶ Informar a % aproximada do resíduo que pode ser reciclada no uso indicado.

⁷ Ensaios / testes a serem efetuados para comprovar se o resíduo realmente pode ser usado na área do especialista.

ESPECIALISTA D

INTERESSE PELO RESÍDUO – TEB

Especialista: D	Área: Metalurgia
Local: EPUSP – Engenharia Metalúrgica	Data: 23 / 04 / 2003

USOS POSSÍVEIS NA ÁREA	APROVEITAMENTO ⁸	FRAÇÃO DE INTERESSE
1.		
2.		
3.	<p style="text-align: center;"><i>Nenhuma aplicação possível.</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Baixo poder calorífico, elevada quantidade de fósforo e enxofre</i></p> <p style="text-align: center;"><i>(inviabilizam uso na metalurgia do ferro).</i></p>	
4.		
5.		
6.		

ENSAIOS ADICIONAIS A SEREM DESENVOLVIDOS ⁹
1.
2.
3.
4.
5.
6.

⁸ Informar a % aproximada do resíduo que pode ser reciclada no uso indicado.

⁹ Ensaios / testes a serem efetuados para comprovar se o resíduo realmente pode ser usado na área do especialista.

ESPECIALISTA E

INTERESSE PELO RESÍDUO – TEB

Especialista: E	Área: Materiais Cerâmicos
Local: EPUSP – Engenharia Metalúrgica e de Materiais	Data: 29 / 04 / 2003

USOS POSSÍVEIS NA ÁREA	APROVEITAMENTO ¹⁰	FRAÇÃO DE INTERESSE
1. Matéria-prima para cerâmica vermelha (em mistura).	± 30 %	Sólida
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

ENSAIOS ADICIONAIS A SEREM DESENVOLVIDOS ¹¹
1. Poder calorífico do material.
2. Queimar resíduo com matéria-prima convencional para avaliar resultado da queima (inclusive cor)
3.
4.
5.
6.

¹⁰ Informar a % aproximada do resíduo que pode ser reciclada no uso indicado.

¹¹ Ensaios / testes a serem efetuados para comprovar se o resíduo realmente pode ser usado na área do especialista.

ANÁLISE TÉCNICA

USO: Matéria-prima para cerâmica vermelha.

PONTOS POSITIVOS	I	V	OBS.
1. Presença de cálcio	3	1	
2. Presença de sílica e alumínio	5	1	
3. Presença matéria orgânica aumenta plasticidade da mistura	3	5	Mas não é importante para o setor.
4.			
5.			
6.			

I = importância para o produto final:

1: pouco importante
3: importância média
5: muito importante

V = vantagem sobre o convencional:

1: praticamente nenhuma
3: pequena vantagem
5: grande vantagem

PONTOS NEGATIVOS	G	PC	OBS.
1. Grande quantidade de enxofre.	3	5	Custo elevado de controle de gases.
2. Grande quantidade de água (material precisa ser seco).	5	3	
3. Odor exalado pelo resíduo.	3	1	
4. Presença de cromo.	5	5	Precisa avaliar potencial de contaminação (lixiviação).
5.			
6.			

G = gravidade:

1: pequena
3: média
5: alta

PC = potencial problema ser controlado (técnica/e):

1: praticamente nenhum
3: médio
5: elevado

ANÁLISE AMBIENTAL

MUDANÇAS NO PROCESSO ATUAL	S
Consumo de água	-3
Consumo de energia	3*
Consumo de combustível	-3
Consumo de matéria-prima	-3
Consumo de mão-de-obra	3**
Distâncias de transporte	0
Geração de emissões	3***
Geração de efluentes	3
Geração de resíduos	0
Necessidade de novas máquinas/equipamentos	3
Possibilidade de reúso do produto após vida útil	0
Reciclabilidade do produto após vida útil	0
Periculosidade do resíduo gerado após vida útil	0

⇒

S = situação:

-5: diminui muito
 -3: diminui
 0: praticamente igual
 3: aumenta
 5: aumenta muito

PONTOS POSITIVOS (foco no processo de reciclagem e não no resíduo)	I	OBS.
1. Diminui consumo recursos naturais.	2	
2. Consome resíduos.	3	
3.		
4.		
5.

I = importância atribuída:

1: baixa
 3: média
 5: alta

PONTOS NEGATIVOS	I	OBS.
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

* Secagem do lodo.

** Manipular pilhas para secagem.

*** Geração de gases de enxofre e necessidade de equipamentos de controle.

ANÁLISE OCUPACIONAL

Preencher apenas para as novas atividades ou processos necessários à reciclagem (independente de onde será feita: no gerador ou no reciclador).

OCORRÊNCIA DE PERIGOS

	NOVOS PROCESSOS OU ATIVIDADES	Ruídos	Vibrações	Frio	Calor	Esforço físico intenso	Radiações não-ionizantes ¹²	Radiações ionizantes (α e β)	Radiações ionizantes (γ e X)	Substâncias explosivas/inflamáveis	Substâncias insalubres (especificar substâncias) ¹³
1	Secagem do lodo				X						
2											
3											
4											
5											
	TOTAL										

¹² Raio laser, infra-vermelho, ultra-violeta, microondas.

¹³ Poeiras minerais (asbestos, manganês e compostos, sílica cristalizada), arsênio, carvão, chumbo, cromo, fósforo, hidrocarbonetos, mercúrio, silicatos, benzeno, agentes biológicos, etc.

ANÁLISE DE MERCADO

A) CONCORRÊNCIA COM OUTROS PRODUTOS

1. Oferta de produtos concorrentes

- ☒ (1) a concorrência é extremamente significativa
- ☐ (2) a concorrência é significativa
- ☐ (5) não existem concorrentes

2. Tendência de novos produtos no mercado (curto a médio prazo)

- ☐ (1) provável
- ☐ (3) improvável
- ☒ (5) altamente improvável

B) INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

3. Vantagens tecnológicas do produto reciclado sobre os concorrentes

- ☒ (1) vantagens inexistentes ou insignificantes
- ☐ (3) vantagens significativas: _____
- ☐ (5) vantagens extremamente significativas: _____

4. Capacidade do consumidor em identificar vantagens tecnológicas

- ☐ (1) potencial baixo (ex.: consumidor não é profissional da área)
- ☒ (3) potencial médio (ex.: consumidor é profissional da área)
- ☐ (5) potencial alto (ex.: consumidor é outra indústria)

5. Desenvolvimento tecnológico do mercado

- ☐ (1) muito alto
- ☐ (3) médio
- ☒ (5) muito baixo

C) INCENTIVOS AOS PRODUTOS/SISTEMAS DE RECICLAGEM

6. Incentivos fiscais

- ☒ (0) incentivos inexistentes
- ☐ (1) existem poucos incentivos
- ☐ (5) existem vários incentivos

7. Incentivos legais

- ☒ (0) incentivos inexistentes
- ☐ (1) existem poucos incentivos
- ☐ (5) existem vários incentivos

D) DEMANDA PARA O PRODUTO RECICLADO**8. Necessidade de produtos com as características técnicas do reciclado**

- ☐ (0) necessidade inexistente
- ☒ (1) existe a necessidade, já satisfeita por produtos convencionais
- ☐ (5) existe a necessidade, não satisfeita por outros produtos

9. Valorização dos “produtos verdes” pelos consumidores

- ☐ (1) praticamente insignificante ou inexistente
- ☒ (3) significativa
- ☐ (5) extremamente significativa

*Indústria que fornece para
construtoras pode ser significativo.*

E) ASPECTOS DO SISTEMA PRODUTIVO**10. Interesse industrial (indústria recicladora) na reciclagem do resíduo**

- ☐ (1) praticamente insignificante ou inexistente
- ☒ (3) significativo
- ☐ (5) extremamente significativo

11. Escala produtiva do sistema de reciclagem

- ☐ (1) pequena escala – praticamente manual
- ☐ (3) média escala
- ☒ (5) larga escala

ANÁLISE ECONÔMICA

PONTOS POSITIVOS	BP	OBS.
1. Economia de energia na mistura.	3	Devido ao aumento da plasticidade.
2. Redução do consumo de combustível para a queima.	3	Devido a presença de matéria orgânica.
3. Redução do consumo de matéria-prima.	1	
4.		
5.		
6.		

BP = benefício potencial sobre o custo final:

- 1: significativo
3: muito significativo
5: extremamente significativo

PONTOS NEGATIVOS	IC	AG	OBS.
1. Controle de liberação de gases.	1	N	Isso não ocorreria em grandes empresas que já utilizam óleo como combustível.
2. Necessidade de secagem do lodo.	2	S	
3. Necessidade de controle da variabilidade do resíduo.	3	S	
4.			
5.			
6.			

IC = impacto no custo final do produto:

- 1: significativo
3: muito significativo
5: extremamente significativo

AG = custo pode ser assumido pelo gerador?

- S: sim
N: não

RECICLADOR: () PAGARIA PELO RESÍDUO () COBRARIA PELO "SERVIÇO" (X) "ACEITARIA" O RESÍDUO

INVESTIMENTOS EM P&D: R\$ 30.000,00 (partindo dos resultados apresentados), R\$ 55.000,00 (refazendo todos ensaios)*

RISCO DO NEGÓCIO

%

* Partindo do princípio que nenhum equipamento ou aparelho será comprado para a realização dos ensaios (serão pagos laboratórios que já realizam os ensaios necessários).

ESPECIALISTA F

INTERESSE PELO RESÍDUO – TEB

Especialista: F	Área: Materiais Cerâmicos
Local: EPUSP – Engenharia Metalúrgica e de Materiais	Data: 29 / 04 / 2003

USOS POSSÍVEIS NA ÁREA	APROVEITAMENTO ¹⁴	FRAÇÃO DE INTERESSE
1. Matéria-prima para cerâmica vermelha.	< 30 %	Fração sólida
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

ENSAIOS ADICIONAIS A SEREM DESENVOLVIDOS ¹⁵
1.
2.
3.
4.
5.
6.

¹⁴ Informar a % aproximada do resíduo que pode ser reciclada no uso indicado.

¹⁵ Ensaios / testes a serem efetuados para comprovar se o resíduo realmente pode ser usado na área do especialista.

ANÁLISE TÉCNICA

USO: Matéria-prima para cerâmica vermelha.

PONTOS POSITIVOS	I	V	OBS.
1. Presença de ferro, cálcio, sílica e alumínio.	3	1	
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			

I = importância para o produto final:

1: pouco importante
3: importância média
5: muito importante

V = vantagem sobre o convencional:

1: praticamente nenhuma
3: pequena vantagem
5: grande vantagem

PONTOS NEGATIVOS	G	PC	OBS.
1. Grande quantidade de enxofre.	5	5	Custo elevado de controle de gases.
2. Grande quantidade de água (material precisa ser seco).	5	3	
3. Fósforo abaixa a temperatura de fusão.	3	5	Complica o controle do sistema.
4.			
5.			
6.			

G = gravidade:

1: pequena
3: média
5: alta

PC = potencial problema ser controlado (técnica/e):

1: praticamente nenhum
3: médio
5: elevado

ANÁLISE AMBIENTAL

MUDANÇAS NO PROCESSO ATUAL	S
Consumo de água	0
Consumo de energia	3*
Consumo de combustível	-3
Consumo de matéria-prima	-3
Consumo de mão-de-obra	0
Distâncias de transporte	0
Geração de emissões	5**
Geração de efluentes	3
Geração de resíduos	0
Necessidade de novas máquinas/equipamentos	3**
Possibilidade de reúso do produto após vida útil	0
Reciclabilidade do produto após vida útil	0
Periculosidade do resíduo gerado após vida útil	0

⇒

S = situação:

-5: diminui muito
-3: diminui
0: praticamente igual
3: aumenta
5: aumenta muito

PONTOS POSITIVOS (foco no processo de reciclagem e não no resíduo)	I	OBS.
1. Diminui consumo recursos naturais.	2	
2. Consome resíduos.	3	
3.		
4.		
5.

I = importância atribuída:

1: baixa
3: média
5: alta

PONTOS NEGATIVOS	I	OBS.
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

* Secagem do lodo.

** Emissão de SO₂ na queima e necessidade de equipamento para controle de gases.

ANÁLISE OCUPACIONAL

Preencher apenas para as novas atividades ou processos necessários à reciclagem (independente de onde será feita: no gerador ou no reciclador).

OCORRÊNCIA DE PERIGOS

	NOVOS PROCESSOS OU ATIVIDADES	Ruídos	Vibrações	Frio	Calor	Esforço físico intenso	Radiações não-ionizantes ¹⁶	Radiações ionizantes (α e β)	Radiações ionizantes (γ e X)	Substâncias explosivas/inflamáveis	Substâncias insalubres (especificar substâncias) ¹⁷
1	Secagem do lodo				X						Vapores com patógenos
2											
3											
4											
5											
	TOTAL										

¹⁶ Raio laser, infra-vermelho, ultra-violeta, microondas.

¹⁷ Poeiras minerais (asbestos, manganês e compostos, sílica cristalizada), arsênio, carvão, chumbo, cromo, fósforo, hidrocarbonetos, mercúrio, silicatos, benzeno, agentes biológicos, etc.

ANÁLISE DE MERCADO

A) CONCORRÊNCIA COM OUTROS PRODUTOS

1. Oferta de produtos concorrentes

- ☒ (1) a concorrência é extremamente significativa
- ☐ (2) a concorrência é significativa
- ☐ (5) não existem concorrentes

2. Tendência de novos produtos no mercado (curto a médio prazo)

- ☒ (1) provável
- ☐ (3) improvável
- ☐ (5) altamente improvável

B) INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

3. Vantagens tecnológicas do produto reciclado sobre os concorrentes

- ☒ (1) vantagens inexistentes ou insignificantes
- ☐ (3) vantagens significativas: _____
- ☐ (5) vantagens extremamente significativas: _____

4. Capacidade do consumidor em identificar vantagens tecnológicas

- ☐ (1) potencial baixo (ex.: consumidor não é profissional da área)
- ☒ (3) potencial médio (ex.: consumidor é profissional da área)
- ☐ (5) potencial alto (ex.: consumidor é outra indústria)

5. Desenvolvimento tecnológico do mercado

- ☐ (1) muito alto
- ☐ (3) médio
- ☒ (5) muito baixo

C) INCENTIVOS AOS PRODUTOS/SISTEMAS DE RECICLAGEM

6. Incentivos fiscais

- ☒ (0) incentivos inexistentes
- ☐ (1) existem poucos incentivos
- ☐ (5) existem vários incentivos

7. Incentivos legais

- ☒ (0) incentivos inexistentes
- ☐ (1) existem poucos incentivos
- ☐ (5) existem vários incentivos

D) DEMANDA PARA O PRODUTO RECICLADO**8. Necessidade de produtos com as características técnicas do reciclado**

- ☐ (0) necessidade inexistente
- ☒ (1) existe a necessidade, já satisfeita por produtos convencionais
- ☐ (5) existe a necessidade, não satisfeita por outros produtos

9. Valorização dos “produtos verdes” pelos consumidores

- ☒ (1) praticamente insignificante ou inexistente
- ☐ (3) significativa
- ☐ (5) extremamente significativa

E) ASPECTOS DO SISTEMA PRODUTIVO**10. Interesse industrial (indústria recicladora) na reciclagem do resíduo**

- ☐ (1) praticamente insignificante ou inexistente
- ☒ (3) significativo
- ☐ (5) extremamente significativo

11. Escala produtiva do sistema de reciclagem

- ☐ (1) pequena escala – praticamente manual
- ☐ (3) média escala
- ☒ (5) larga escala

ANÁLISE ECONÔMICA

PONTOS POSITIVOS	BP	OBS.
1. Redução do consumo de combustível para queima.	3	Devido a presença de matéria orgânica.
2. Redução do consumo de matéria-prima.	1	
3.		
4.		
5.		
6.		

BP = benefício potencial sobre o custo final:

- 1: significativo
3: muito significativo
5: extremamente significativo

PONTOS NEGATIVOS	IC	AG	OBS.
1. Controle de liberação de gases.	1	N	
2. Necessidade de secagem do lodo.	2	S	
3. Necessidade de controle da variabilidade do resíduo.	3	S	
4.			
5.			
6.			

IC = impacto no custo final do produto:

- 1: significativo
3: muito significativo
5: extremamente significativo

AG = custo pode ser assumido pelo gerador?

- S: sim
N: não

RECICLADOR: () PAGARIA PELO RESÍDUO () COBRARIA PELO “SERVIÇO” (X) “ACEITARIA” O RESÍDUO

INVESTIMENTOS EM P&D: R\$ 100.000,00

RISCO DO NEGÓCIO

%

Argila vermelha: ± R\$ 1,00/ t

Caulim Branco: ± R\$ 350,00/ t

Argilito: ± R\$ 50,00/ t

ESPECIALISTA G

INTERESSE PELO RESÍDUO – TEB

Especialista: G	Área: Caracterização tecnológica de minerais
Local: EPUSP – Engenharia de Minas	Data: 13 / 05 / 2003

USOS POSSÍVEIS NA ÁREA	APROVEITAMENTO ¹⁸	FRAÇÃO DE INTERESSE
1. Co-processamento em fornos de cimento.	± 30 %	Fração sólida
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

CONSIDERAÇÕES

PONTOS NEGATIVOS:

- Excesso de água (necessidade de secar o material)
- Quantidade elevada de enxofre (geração de gases SO_x) – pode ser corrigida na dosagem
- Alta quantidade de cloro – pode ser corrigida na dosagem.

Sugestão: Estudar a possibilidade de alteração dos parâmetros físico-químicos da superfície da fração sólida, para diminuir a quantidade de água do resíduo.

¹⁸ Informar a % aproximada do resíduo que pode ser reciclada no uso indicado.

ESPECIALISTA H

INTERESSE PELO RESÍDUO – TEB

Especialista: H	Área: Concretos e Argamassas – Construção Civil
Local: Faculdade de Engenharia Civil – FEC – UNICAMP	Data: 17 / 05 / 2003

USOS POSSÍVEIS NA ÁREA	APROVEITAMENTO ¹⁹	FRAÇÃO DE INTERESSE
1. Uso como adição para argamassas e concretos (após queima da matéria orgânica).	± 17 %	Mineral
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

ENSAIOS ADICIONAIS A SEREM DESENVOLVIDOS ²⁰
1.
2.
3.
4.
5.
6.

¹⁹ Informar a % aproximada do resíduo que pode ser reciclada no uso indicado.

²⁰ Ensaios / testes a serem efetuados para comprovar se o resíduo realmente pode ser usado na área do especialista.

ANÁLISE TÉCNICA

USO: Uso como adição para argamassas e concretos.

PONTOS POSITIVOS	I	V	OBS.
1. Grande quantidade de sílica e cálcio.	5	1	
2. Granulometria apropriada.	1	1	
3.			
4.			
5.			
6.			

I = importância para o produto final:
1: pouco importante
3: importância média
5: muito importante

V = vantagem sobre o convencional:
1: praticamente nenhuma
3: pequena vantagem
5: grande vantagem

PONTOS NEGATIVOS	G	PC	OBS.
1. Presença de matéria orgânica (grande quantidade).	5	3	
2. Odor exalado pelo resíduo.	5	1	
3.			
4.			
5.			
6.			

G = gravidade:
1: pequena
3: média
5: alta

PC = potencial problema ser controlado (técnica/e):
1: praticamente nenhum
3: médio
5: elevado

ANÁLISE AMBIENTAL

MUDANÇAS NO PROCESSO ATUAL	S
Consumo de água	0
Consumo de energia	3*
Consumo de combustível	-3**
Consumo de matéria-prima	-3
Consumo de mão-de-obra	0
Distâncias de transporte	-3**
Geração de emissões	0***
Geração de efluentes	0
Geração de resíduos	0
Necessidade de novas máquinas/equipamentos	3*
Possibilidade de reúso do produto após vida útil	0
Reciclabilidade do produto após vida útil	0
Periculosidade do resíduo gerado após vida útil	0

⇒

S = situação:

-5: diminui muito
-3: diminui
0: praticamente igual
3: aumenta
5: aumenta muito

PONTOS POSITIVOS (foco no processo de reciclagem e não no resíduo)	I	OBS.
1. Diminui o consumo de recursos naturais (agregados).	2	
2. Consome resíduos.	3	
3.		
4.		
5.

I = importância atribuída:

1: baixa
3: média
5: alta

PONTOS NEGATIVOS	I	OBS.
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

* Caso o processo gere alguma escória, dependendo da granulometria ela terá de ser moída (gerando ruído e poeira).

** Como substitui areia que geralmente vem de áreas distantes dos grandes centros, diminui distâncias de transporte.

*** Gera poeira (que pode ser controlada), diminui a emissão resultante do transporte, mas aumenta emissão na queima do resíduo.

ANÁLISE OCUPACIONAL

Preencher apenas para as novas atividades ou processos necessários à reciclagem (independente de onde será feita: no gerador ou no reciclador).

OCORRÊNCIA DE PERIGOS

	NOVOS PROCESSOS OU ATIVIDADES	Ruídos	Vibrações	Frio	Calor	Esforço físico intenso	Radiações não-ionizantes ²¹	Radiações ionizantes (α e β)	Radiações ionizantes (γ e X)	Substâncias explosivas/inflamáveis	Substâncias insalubres (especificar substâncias) ²²
1	Queima				X						
2	Moagem (escória)	X	X								
3											
4											
5											
	TOTAL										

²¹ Raio laser, infra-vermelho, ultra-violeta, microondas.

²² Poeiras minerais (asbestos, manganês e compostos, sílica cristalizada), arsênio, carvão, chumbo, cromo, fósforo, hidrocarbonetos, mercúrio, silicatos, benzeno, agentes biológicos, etc.

ANÁLISE DE MERCADO

A) CONCORRÊNCIA COM OUTROS PRODUTOS

1. Oferta de produtos concorrentes

- ☒ (1) a concorrência é extremamente significativa
- ☐ (2) a concorrência é significativa
- ☐ (5) não existem concorrentes

2. Tendência de novos produtos no mercado (curto a médio prazo)

- ☐ (1) provável
- ☒ (3) improvável
- ☐ (5) altamente improvável

B) INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

3. Vantagens tecnológicas do produto reciclado sobre os concorrentes

- ☒ (1) vantagens inexistentes ou insignificantes
- ☐ (3) vantagens significativas: _____
- ☐ (5) vantagens extremamente significativas: _____

*Difícil dizer neste momento.
Por enquanto, inexistentes.*

4. Capacidade do consumidor em identificar vantagens tecnológicas

- ☐ (1) potencial baixo (ex.: consumidor não é profissional da área)
- ☐ (3) potencial médio (ex.: consumidor é profissional da área)
- ☒ (5) potencial alto (ex.: consumidor é outra indústria)

5. Desenvolvimento tecnológico do mercado

- ☐ (1) muito alto
- ☐ (3) médio
- ☒ (5) muito baixo

C) INCENTIVOS AOS PRODUTOS/SISTEMAS DE RECICLAGEM

6. Incentivos fiscais

- ☒ (0) incentivos inexistentes
- ☐ (1) existem poucos incentivos
- ☐ (5) existem vários incentivos

7. Incentivos legais

- ☒ (0) incentivos inexistentes
- ☐ (1) existem poucos incentivos
- ☐ (5) existem vários incentivos

D) DEMANDA PARA O PRODUTO RECICLADO**8. Necessidade de produtos com as características técnicas do reciclado**

- ☒ (0) necessidade inexistente
- ☐ (1) existe a necessidade, já satisfeita por produtos convencionais
- ☐ (5) existe a necessidade, não satisfeita por outros produtos

9. Valorização dos “produtos verdes” pelos consumidores

- ☒ (1) praticamente insignificante ou inexistente
- ☐ (3) significativa
- ☐ (5) extremamente significativa

E) ASPECTOS DO SISTEMA PRODUTIVO**10. Interesse industrial (indústria recicladora) na reciclagem do resíduo**

- ☐ (1) praticamente insignificante ou inexistente
- ☐ (3) significativo
- ☐ (5) extremamente significativo

Depende de viabilidade econômica.

11. Escala produtiva do sistema de reciclagem

- ☐ (1) pequena escala – praticamente manual
- ☒ (3) média escala
- ☐ (5) larga escala

Depende dos resultados de P&D e das aplicações específicas (exemplo: mercado de concreto leve é diferente de mercado de concreto massa).

ANÁLISE ECONÔMICA

PONTOS POSITIVOS	BP	OBS.
1. Reduz custos de transporte com agregados (jazidas distantes dos grandes centros de consumo).	3	
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

↓

BP = benefício potencial sobre o custo final:

- 1: significativo
3: muito significativo
5: extremamente significativo

PONTOS NEGATIVOS	IC	AG	OBS.
1. Necessidade de retirar matéria orgânica.*	3	S	
2. Necessidade de controlar emissão de gases na queima.	3	N	
3.			
4.			
5.			
6.			

↓

IC = impacto no custo final do produto:

- 1: significativo
3: muito significativo
5: extremamente significativo

↓

AG = custo pode ser assumido pelo gerador?

- S: sim
N: não

RECICLADOR: (X) PAGARIA PELO RESÍDUO** () COBRARIA PELO “SERVIÇO” () “ACEITARIA” O RESÍDUO

INVESTIMENTOS EM P&D: ± R\$ 30.000,00

RISCO DO NEGÓCIO

%

* O setor (construção civil) só consumiria este produto se ele chegasse pronto (sem a matéria orgânica) ao local de consumo (obras); logo isso deve ser feito por uma indústria que queime o resíduo (gerador, outro setor, etc.)

** O resíduo pode ser até comprado (construção civil pagaria pelo resíduo) mas tudo vai depender do desempenho demonstrado em P&D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos – Classificação – NBR 10004**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Lixiviação de Resíduos – Procedimento – NBR 10005**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Solubilização de Resíduos – Procedimento – NBR 10006**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Amostragem de Resíduos – Procedimento – NBR 10007**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – NBR 6457**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **Grãos de pedregulhos retidos na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água – Método de ensaio – NBR 6458**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica – Método de ensaio – NBR 6508**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Solo – Análise granulométrica – NBR 7181**. Rio de Janeiro, 1984.

ABU-KADDOURAH, Z. et al. Effects of high temperature melting on the porosity and microstructure of slags from domestic sewage sludge. **Water Science & Technology**, v. 41, n. 8, p. 99-105, 2000.

ALCOCK, R. E.; GEMMILL, R.; JONES, K. C. Improvements to the UK PCDD/F and PCB atmospheric emission inventory following an emissions measurement programme. **Chemosphere**, v. 38, n. 4, p. 759-70, 1999.

ALLEMAN, J. E.; ASCE, M.; BERMAN, N. A. Constructive sludge management: Briobrick. **Journal of Environmental Engineering**, v. 110, n. 2, April 1984.

ANDERSON, M. et al. Case study involving using fluidised bed incinerator sludge ash as a partial clay substitute in brick manufacture. **Water Science & Technology**, v. 34, n. 3, p. 507-15, 1996.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.)

Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2001. p.319-397. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

BASE DE DADOS TROPICAL – BDT. Campinas. Departamento da Fundação André Tosello, cujo objetivo é a divulgação de informação ambiental para a comunidade científica, entre outras a Agenda 21. Disponível em: < <http://www.bdt.fat.org.br/publicacoes/politica/agenda21/cap21> > Acesso em: 09 de maio 2003.

BHATTITY, J. I.; REID, K. J. Compressive strength of municipal sludge ash mortars. **ACI Materials Journal**, v. 86, n. 4, p. 394-400, July-August 1989.

BROSCH, C.D. et. al. **Fabricação de agregado leve a partir de lodo de esgoto de São Paulo.** São Paulo, IPT/SABESP, s.d.

BROSCH, C.D.; ALVARINHO, S. B.; SOUZA, H. R. **Fabricação de agregado leve a partir de lodo de esgoto de São Paulo.** São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1976. (Relatório nº 8779).

CELIK, T.; BAYASI, Z. Performance of clay-blended sludge aggregate. **Concrete International**, p. 63-5, January 1995.

CESÁRIO SILVA, S. M. et al. Principais contaminantes do lodo. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2001. p.69-121. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. São Paulo. Órgão ligado à Secretaria do Meio Ambiente do Governo de São Paulo. Entre vários assuntos ambientais, apresenta parâmetros de qualidade das águas. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/rios/parametros.htm> >. Acesso em: 11 de nov. 2003.

_____. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação - P. 4230.** São Paulo: CETESB, 1999.

_____. **Sistemas de esgotos sanitários.** 2.ed. São Paulo: CETESB, 1977. 467p.

_____. **Decreto nº 8468 de 08 de setembro de 1976.** O artigo 19-A estabelece os limites para lançamento de poluentes em sistemas de esgotos. São Paulo, 1976.

CHU, C. W.; POON, C. S.; CHEUNG, R. Y. H. Characterization of raw sludge, chemically modified sludge and anaerobically digested sludge in Hong Kong. **Water Science & Technology**, v. 38, n. 2, p. 25-32, 1998.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 20 de 18 de junho de 1986**. Estabelece os padrões de lançamento de efluentes em corpos receptores e também o padrão de qualidade dos corpos receptores. Brasília, 1986.

CONSULTEME. São Paulo. Página educacional, com tópicos de ciências. Disponível em: < <http://www.consulteme.com.br/ciencias/combusc.htm> >. Acesso em: 08 de ago. 2002.

EDULJEE, G.; CAINS, P. Control of dioxin emissions from waste combustors. **Filtration & Separation**, p. 599-603, July/August 1997.

ENDO, H.; NAGAYOSHI, Y.; SUZUKI, K. Production of glass ceramics from sewage sludge. **Water Science & Technology**, v. 36, n. 11, p. 235-41, 1997.

ENGEVIX; LATIN CONSULT. **Revisão e atualização do plano diretor de esgotos da RMSP**. São Paulo, SABESP, 2000.

ETEP; ESTÁTICA; JNS. **Plano diretor de uso/disposição dos lodos das ETE da RMSP**. São Paulo, SABESP, 1998. (Projeto Tietê).

FERRARIS, M. et al. Glass matrix composites from solid waste materials. **Journal of the European Ceramic Society**, n. 21, p. 453-60, 2001.

FIESP – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. São Paulo. Organização e histórico dos Seminários da Indústria Brasileira da Construção Civil – *Construbusiness*. Disponível em: < <http://www.fiesp.com.br/construbusiness> >. Acesso em: 11 de nov. 2003.

FRANÇA, R. G. **Redução de metais pesados em lodo de esgoto por meio do processo de biolixiviação visando a produção agrícola**. 2003. 89p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

GEORGE, M. S. Concrete aggregate from wastewater sludge. **Concrete International Design & Construction**, v. 8, n. 11, p. 27-30, November 1986.

GOLDENSTEIN, S. O desafio ambiental na maior metrópole do país. [Entrevista da Secretária Municipal do Meio Ambiente de SP]. **Revista Ecologia e Desenvolvimento**, São Paulo: 2002. Ano 11, nº 99. Disponível em: < http://www.uol.com.br/ecologia/pesquisa-public/ecologia/ecologia_99 .htm >. Acesso em: 09 de maio 2003.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.;

FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2001. p.159-259. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decreto nº 47.397-02 de 04 de dezembro de 2002**. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Diário Oficial do Estado - Executivo, de 05 de dezembro de 2002.

GREENPEACE. São Paulo. Apresenta vários artigos técnicos sobre meio ambiente, entre eles “Dioxinas e furanos: efeitos sobre a saúde humana” de Darryl Luscombe, PhD. Disponível em: < <http://www.greenpeace.org.br> >. Acesso em: 17 de dez. 2002.

HE, P. et al. Mechanism and kinetics of low-temperature thermo-chemical conversion process for sewage sludge. **Water Science & Technology**, v. 44, n. 10, p. 341-7, 2001.

HICSAN; ETEP. **Plano diretor de resíduos sólidos da RMSP**. São Paulo, CETESB, 1994. (Projeto Tietê).

HUANG, C. et al. Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making. **Water Science & Technology**, v.44, n. 10, p. 273-7, 2001.

HYLANDER, L. D.; SOLLENBERG, H.; WESTAS, H.. A three-stage system to remove mercury and dioxins in flue gases. **The Science of the Total Environment**, n. 304, p. 137-44, 2003.

IYER, R. S.; SCOTT J. A. Power station fly ash – a review of value-added utilization outside of the construction industry. **Resources Conservation & Recycling**, n. 31, p. 217-28, 2001.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

JUN, K. S. Et al. Chemical characteristics and leachability of organically contaminated heavy metal sludge solidified by silica fume and cement. **Water Science & Technology**, v. 44, n. 2-3, p. 399-407, 2001.

KHANBILVARDI, R.; AFSHARI, S. Sludge ash as fine aggregate for concrete mix. **Journal of Environmental Engineering**, v. 121, n. 9, p. 633-8, September 1995.

- KIKUCHI, R. Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 31, p. 137-47, 2001.
- LEROY, C. et al. Production of glass-ceramics from coal ashes. **Journal of the European Ceramic Society**, n. 21, p. 195-202, 2001.
- LOTITO, V. et al. Sludge incineration tests on circulating fluidised bed furnace. **Water Science & Technology**, v. 44, n. 2, 2001.
- LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFGM, 2001. p.123-157. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).
- LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte do lodo. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFGM, 2001. p.399-423. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).
- LUE-HING, C. et al. Sludge management in highly urbanized areas. **Water Science & Technology**, v. 34, n. 3-4, p. 517-24, 1996.
- LUTS, D. et al. Co-incineration of dried sewage sludge in coal-fired power plants: a case study. **Water Science & Technology**, v. 42, n. 9, p. 259-68, 2000.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1.ed. São Paulo: Pini, 1994. 537p.
- MELO, H. G. et al. **Química Tecnológica Geral**. São Paulo: Apostila de Laboratório da disciplina PQI – 2110 da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. Cap. 1, p. 2-7: Determinação do poder calorífico de um combustível sólido ou líquido pela bomba calorimétrica.
- METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3.ed. New York: McGraw-Hill Inc., 1991. 1334p.
- MIKI, M.K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**. 1998. 405p. 2v. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

- MININNI, G. et al. Influence of organic chlorine on emissions from sludge incineration by a pilot fluidised bed furnace. **Water Science & technology**, v.42, n. 9, p. 243-50, 2000.
- MININNI, G.; BRAGUGLIA, C. M.; MARANI, D. Partitioning of Cr, Cu, Pb and Zn in sewage sludge incineration by rotary kiln and fluidized bed furnaces. **Water Science & Technology**, v. 41, n. 8, p. 61-8, 2000.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 1469 de 29 de dezembro de 2000**. Estabelece padrões de qualidade da água para usos imediatos. Brasília, 2000.
- MISSO, O. Falta de área para aterro agrava problema. [Entrevista do Secretário Municipal do Serviços e Obras de SP]. **O Estado de São Paulo**, São Paulo: 02 fev. 2003. Disponível em: < <http://www.estado.estadao.com.br/editoriais/2003/02/02/cid020.htm> >. Acesso em: 08 de maio 2003.
- MONZÓ, J. et al. Mechanical behavior of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content. **Cement and Concrete Research**, n. 29, p. 87-94, 1999.
- MONZÓ, J. et al. Use of sewage sludge ash (SSA) – cement admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 9, p. 1389-98, 1996.
- MORALES, G. **Verificação e avaliação da reatividade pozolânica da cinza de lodo de esgoto da cidade de Londrina**. 1994. 170p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.
- _____. **Caracterização do agregado leve obtido a partir do lodo de esgoto da cidade de Londrina**. 1989. 123p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.
- MORTITA, H.; TSUBOI, H. Basic investigation on the chemical forms of heavy metals in a sewage treatment plant. **Water Science & Technology**, v. 42, n. 9, p. 159-65, 2000.
- NDAJI, F. E. et al. Temperature programmed combustion studies of the co-processing of coal and waste materials. **Fuel, Elsevier**, n. 78, p. 301-7, 1999.
- OBRADOR, A.; et al. Influence of thermal treatment on sequential extraction and leaching behaviour of trace metals in a contaminated sewage sludge. **Bioresource Technology**, n. 76, p. 259-64, 2001.
- OKUNO, N. et al. Evaluation of thermal sludge solidification. **Water Science & Technology**, v. 36, n. 11, p. 227-33, 1997.

- OKUNO, N.; TAKHASHI, S. Full scale application of manufacturing bricks from sewage. **Water Science & Technology**, v. 36, n. 11, p. 243-50, 1997.
- OKUNO, N.; YAMADA, A. Evaluation of full scale thermal solidification processes implemented in Tokyo lightweight aggregate, slag and brick. **Water Science & Technology**, v. 41, n. 8, p. 69-76, 2000.
- ONAKA, T. Sewage can make Portland cement: a new technology for ultimate reuse of sewage sludge. **Water Science & Technology**, v. 41, n. 8, p. 93-8, 2000.
- OZAKI, M.; WATANABE, H.; WIEBUSCH, B. Characteristics of reavy metal release from incinerated ash, melted slag and their re-products. **Water Science & Technology**, v. 36, n. 11, p. 267-74, 1997.
- PAN, S. C.; TSENG, D. H. Sewage sludge ash characteristics and its potential applications. **Water Science & Technology**, v. 44, n. 10, p. 261-7, 2001.
- PETROBRÁS – SECRETARIA EXECUTIVA DO CONPET. Rio de Janeiro. Equivalências dos principais combustíveis e seus poderes caloríficos. Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/conpet/Fatconve.htm> >. Acesso em: 22 de jul. 2002.
- RICHARDS, B. K. et al. Effect of sludge-processing mode, soil texture and soil pH on metal mobility in undisturbed soil columns under accelerated loading. **Environmental Pollution**, n. 109, p. 327-46, 2000.
- SABESFÉRTIL. O uso do bio sólido na agricultura – **Manual de utilização do produto**. REG. MA – SP – 09599 00001-0; ETE Franca, 2000.
- SABESP. São Paulo. Página na Intranet da Superintendência de Esgotos da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Apresenta relatórios operacionais das ETEs da RMSP. Disponível em: < http://10.7.129.15/aonline/net_a/AE/AE.asp >. Acesso em: 02 de set. 2002.
- SAMARAS, P. el al. Emissions of chlorinated aromatics during sludge combustion. **Water Science & Technology**, v. 42, n. 9, p. 251-8, 2000.
- SANTOS, H. F. Normatização para o uso agrícola dos bio sólidos no exterior e no Brasil. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFGM, 2001. p.425-464. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

- _____. Tecnologias de uso útil do lodo dos esgotos. In: Encontro Técnico Associação dos Engenheiros da SABESP, XII, São Paulo, 2001. Anais. São Paulo: 2001. 1 CD-ROM.
- _____. Light aggregate and organo-mineral fertilizer from digested sewage sludges. A general view on other beneficial uses for sewage treatment plants by-products. In: FIRST ITALIAN-BRAZILIAN SYMPOSIUM ON SANITARY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, São Paulo, 1992. 17 p.
- SCANCAR, J. et al. Total metal concentrations and partitioning of Cd, Cr, Cu, Fe, Ni and Zn in sewage sludge. **The Science of the Total Environment**, n. 250, p. 9-19, 2000.
- SIMONDI, S.; YAMADA, Y.; SARDINHA, V. L. A. Propriedades e aplicações do agregado leve de lodo de esgoto.. **Revista DAE**, Sabesp, n. 126, p. 291-8, 1981.
- SLOOT, H. A. et al. **Harmonization of leaching / extraction tests**. Amsterdam: Elsevier, 1997. 277p.
- SOUZA SANTOS, P. **Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1975. 2v.
- SOUZA SANTOS, P.; MITIDIERI, A. Desenvolvimento de uma fábrica de agregado leve em São Paulo, SP. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE MINERALOGIA, 1., São Paulo, 1970. **Resumos**. São Paulo, 1970.
- STOLAREK, P.; LEDAKOWICZ, S. Thermal processing of sewage sludge by drying, pyrolysis, gasification and combustion. **Water Science & Technology**, v. 44, n. 10, p. 333-9, 2001.
- SUN, D. D. et al. Stabilization of heavy metals on spent fluid catalytic cracking catalyst using marine clay. **Water Science & Technology**, v. 44, n. 10, p. 285-91, 2001.
- TAY, J. H.; SHOW, K. Y.; HONG, S.Y. Reuse of industrial sludge as construction aggregates. **Water Science & technology**, v. 44, n. 10, p. 269-72, 2001.
- TAY, J. H.; SHOW, K.Y. Resource recovery of sludge as a building and construction material – a future trend in sludge management. **Water Science & Technology**, v. 36, n. 11, p. 259-66, 1997.
- TAY, J. H.; SHOW, K.Y. Properties of cement made from sludge. **Journal of Environmental Engineering**, v. 117, n. 2, p. 236-46, Mar./Apr. 1991.

- TAY, J. H.; YIP, W. K.; SHOW, K.Y. Clay-blended sludge as lightweight aggregate concrete material. **Journal of Environmental Engineering**, v. 117, n. 6, p. 834-44, 1991.
- TAY, J.H. Properties of pulverized sludge ash blended cement. **ACI Materials Journal**, v. 84, n. 5, p. 358-64, September-October 1987.
- _____. Bricks Manufactured from sludge. **Journal of Environmental Engineering**, v. 113, n. 2, p. 278-84, April 1987.
- _____. Sludge ash as filler for Portland cement concrete. **Journal of Environmental Engineering**, v. 113, n. 2, p. 345-51, 1987.
- TEIXEIRA PINTO, M. A. Higienização de lodos. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFGM, 2001. p.261-297. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).
- TRAUNER, E. J. Sludge ash bricks fired to above and below ash-vitrifying temperature. **Journal of Environmental Engineering, ASCE**, v. 119, n. 3, p. 506-19, 1993.
- TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM SOBRINHO, P. (Ed.) **Biossólidos na Agricultura**. São Paulo: Sabesp, 2001. 468p .
- USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guide to field storage of biosolids**. EPA/ 832-B-00-007. Washington, DC, USA, 2000. 134p.
- _____. **Standards for the use or disposal of sewage sludge**. EPA/ 40 CFR Part 503. Washington, DC, USA, 1997. 25p.
- VALLS, S.; VÁZQUEZ, E. Stabilisation and solidification of sewage sludges with Portland cement. **Cement and Concrete Research**, n. 30, p. 1671-8, 2000.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento dos esgotos**. 2.ed. Belo Horizonte: DESA-UFGM, 1996. 243p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1).
- VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFGM, 2001. p.13-16. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

- VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFGM, 2001. p.17-67. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).
- VON SPERLING, M.; MOREIRA da COSTA, A. M. L.; CASTRO, A. A. Esgotos Sanitários. In: BARROS, R.T.V. et al. (Ed.) **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFGM, 1995. v. 2. p. 113-60.
- WENG, C. G.; CHANG, E. E.; CHIANG, P. C. Characteristics of new coccine dye adsorption onto digested sludge particulates. **Water Science & Technology**, v. 44, n. 10, p. 279-84, 2001.
- WERTHER, J. OGADA, T. Sewage sludge combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 25, p. 55-116, 1999.
- WIEBUSCH, B. et al. Assessment of leaching tests on construction material made of incinerator ash (sewage sludge): investigations in Japan and Germany. **Water Science & Technology**, v. 38, n. 7, p. 195-205, 1998.
- WIEBUSCH, B.; SEYFRIED, C. F. Utilization of sewage sludge ashes in the brick and tile industry. **Water Science & Technology**, v. 36, n. 11, p. 251-8, 1997.
- WONG, V.; HO, G. Metal speciation and leachability of heavy metals from EnersludgeTM ash in concrete. **Water Science & Technology**, v. 41, n. 08, p. 53-60, 2000.
- YIP, W. K.; TAY, J. H. Aggregate made from incinerated sludge residue. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 2, n. 2, p. 84-93, May 1990.
- ZHANG, F.; YAMASAKI, S.; NANZYU M. Application of waste ashes to agricultural land – effect of incineration temperature on chemical characteristics. **The Science of the Total Environment**, n. 264, p. 205-14, 2001.
- ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos**. 2003. 481p. 2v. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.