UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

NAYARA BATISTA BORGES

APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO
PRELIMINAR DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

SÃO CARLOS

2014

NAYARA BATISTA BORGES

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO
PRELIMINAR DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Ciências: Engenharia
Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. José Roberto Campos

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B
732a Borges, Nayara Batista
 Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento
 preliminar de estações de tratamento de esgoto / Nayara
 Batista Borges; orientador José Roberto Campos. São
 Carlos, 2014.

 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área
 de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2014.

 1. Aproveitamento de resíduos. 2. Areia. 3.
 Biodiesel. 4. Concreto não estrutural. 5. Degradação.
 6. Poder calorífico. 7. Tratamento de esgoto. 8.
 Resíduos do tratamento preliminar. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **NAYARA BATISTA BORGES**.

Título da tese: "Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto".

Data da defesa: 28/11/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **José Roberto Campos (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

A PROVA DA

Prof. Dr. **Javier Mazariegos Pablos**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/IAU)

APROVADA

Prof. Dr. **Marco Antonio Penalva Reali**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **João Sérgio Cordeiro**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Prof. Dr. **Ronan Cleber Contrera**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

CERTEZA

“De tudo ficaram 3 coisas:

A certeza de que estamos sempre começando

A certeza de que precisamos continuar

*A certeza de que seremos interrompidos antes de
terminar*

Portanto devemos:

Fazer da interrupção um novo caminho

Da queda, um passo de dança

Do medo, uma escada

Do sonho, uma ponte

Da procura, um encontro”

Fernando Pessoa

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

A todas as pessoas que me ajudaram, me apoiaram e me incentivaram nessa caminhada, dedico essa conquista. Em especial ao meu orientador José Roberto Campos, por acreditar em mim e ser responsável por não permitir que desistisse quando os obstáculos apareceram.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

AGRADECIMENTOS

Desafio tão grande como escrever esta tese, foi utilizar poucas palavras para agradecer todas aquelas pessoas, esperando não ser traída pela memória, que fizeram parte da realização desse sonho...

Aos meus pais Sânzio e Andréa, por todo apoio e ensinamentos que me deram durante toda a vida.

Aos meus tios Maurício e Sônia, pelo esforço que fizeram para que me sentisse em minha própria casa, sempre com muito carinho e amizade.

Aos meus irmãos Natália e Pedro, por toda uma vida passada juntos, e por todos os momentos, sem me esquecer da minha mais nova irmã Marcela, que também faz parte desse meu caminho.

Ao meu namorado Willian, pelo companheirismo, carinho, amizade, amor e por me apoiar nas horas mais difíceis. Agradeço também sua família por estar sempre presente.

Aos professores Javier Mazariegos Pablos, João Sergio Cordeiro, Marco Antonio Penalva Reali, Ronan Cleber Contrera e Valdir Schalch, pelas valiosas sugestões e correções.

Aos técnicos do laboratório de Saneamento, Paulo, Júlio, Maria Aparecida, Aline, Bianca e Sabrina pela disposição e ajuda sempre presentes durante a realização deste trabalho. Registro minha mais profunda gratidão.

Ao SAAE (São Carlos-SP) e todos seus funcionários da ETE Monjolinho, em especial ao Gilcimar e ao Milton, pela ajuda fundamental na execução dos ensaios e por tornarem o trabalho mais agradável, sem me esquecer do Edmilson e Marcel pelo empenho na implantação da parte experimental. Ressalto que, sem vocês, não teria concluindo esse trabalho. Minha eterna gratidão!

Ao professor Javier Mazariegos Pablos e aos técnicos Tico, Sérgio e Paulo do Laboratório de Construção Civil de Arquitetura e Urbanismo que não mediram esforços para me ajudar nos ensaios com a areia. Obrigada pela paciência e apoio incondicional, sem vocês, certamente este trabalho não chegaria a bom termo.

À técnica Teresa Hoffmann e a Bianca, por todo o apoio e o auxílio na realização dos ensaios para obtenção do Biodiesel.

Aos funcionários do SHS, Wagner, Sá, Priscila, Pavi, Cecília, Márcia, Valderez, André por toda atenção e colaboração, em especial a Rose pela amizade e carinho.

À Flávia e à Fernanda, funcionárias da contabilidade, por toda paciência e empenho no controle financeiro do auxílio-pesquisa.

Aos meus colegas de Doutorado, também orientados pelo Prof. Campos: Rodrigo, Aurélia e Beatriz, em especial ao Bruno Pessotto, por toda convivência, colaboração e auxílio prestado ao longo deste trabalho.

À Fundação de Amparo e Pesquisa de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro e incentivo à pesquisa (Processo FAPESP nº2011/51234-6).

Aos Professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pelo convívio e apoio ao longo do meu Doutorado.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pela receptividade.

Às empresas SEREC– Serviços Engenharia Consultiva e ENGECORPS – Corpo de Engenheiros Consultores S.A. por permitir a oportunidade de conciliar minhas atividades profissionais e acadêmicas. E aos meus colegas de trabalho que sempre me incentivaram e aguentaram meu mau humor nos momentos de desespero; destaco aqueles que estiveram presentes desde o início: Cristiano, José Antônio, Luís Fernando, Octávio e Jéssica.

As minhas grandes amigas (“Turminha da matinê”) pelo exemplo de amizade e pelos momentos de descontração.

À Ludmila, Daiane e Jaque pelo convívio ao longo desses anos e por todas as conversas e conselhos.

Àquelas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

BORGES, N.B. **Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto**. 2014. 234 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Os sólidos grosseiros, sedimentáveis e flutuantes são removidos no sistema de tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto e, de forma geral, dispostos em aterros sanitários e lixões, sem preocupação relacionada ao seu potencial de aproveitamento, redução, recuperação e impactos ambientais. Apesar da falta de importância atribuída, esses resíduos se mostram um dos problemas no gerenciamento de estações no que se refere ao manuseio, tratamento e destinação final. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo demonstrar a potencialidade do aproveitamento dos resíduos removidos no tratamento preliminar de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), tomando-se como referência a ETE Monjolinho em São Carlos-SP (com capacidade de atendimento de 258.000 habitantes). Para atingir este propósito, foi avaliada a potencialidade do uso dos materiais removidos na unidade do tratamento preliminar, como fontes de energia e de matéria-prima, enfocando tema pouco explorado. Foram estudados os resíduos: i) removidos nos gradeamentos grosseiro e fino, visando seu uso como combustível; ii) o material sedimentável retido nos desarenadores, com intuito de utilizá-lo como agregado para argamassa e concreto não estrutural na construção civil; e, iii) os óleos e graxas removidos, visando o seu aproveitamento como insumo para produção de biocombustível; e também foi avaliada a degradação aeróbia e anaeróbia deste tipo de material. Em relação a cada tipo de resíduo foi possível verificar: i) a potencialidade da geração de energia a partir dos resíduos removidos nos gradeamentos de estações de tratamento de esgoto, tendo em vista os elevados resultados do poder calorífico inferior ($4.837 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para resíduos do gradeamento grosseiro e $5.059 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para resíduos do gradeamento fino) e baixos valores na geração de cinzas (15,91% para resíduos do gradeamento grosseiro e 9,60% para resíduos do gradeamento fino); ii) a viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização da areia residual, removida nos desarenadores de ETEs, como agregado miúdo na incorporação de argamassas para revestimento e preparação de concreto não estrutural, desde que seja submetida ao procedimento de limpeza e secagem; iii) não foi possível obter biodiesel a partir do material flutuante removido nos desarenadores, uma vez que esse resíduo apresentou baixa concentração de óleos e graxas se comparado às outras matérias primas e grande quantidade de sólidos, sendo esses, em boa parte, de natureza orgânica, em consequência disso foi comprovada a potencialidade da degradação aeróbia e anaeróbia do material flutuante, resultando na redução de carga orgânica a ser aplicada nas unidades subsequentes do processo de tratamento.

Palavras chaves: Aproveitamento. Areia. Biodiesel. Concreto não Estrutural. Degradação. Poder Calorífico. Tratamento de Esgoto. Resíduos do Tratamento Preliminar.

ABSTRACT

BORGES, N.B. **Utilization of the waste generated in the preliminary treatment of sewage treatment plants.** 2014. 234 f. Thesis (Doctoral) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2014.

The coarse, settleable and floating solids are removed in the system of preliminary treatment of the sewage treatment station and are generally disposed in landfills and dumps, regardless of their potential use, reduction, recovery and its environmental impacts. Despite the lack of recognizable relevance, such waste constitutes one of the problems in the management of stations with regard to the handling, treatment and disposal. In this context, the current investigation aims at demonstrating the potential of the use of the waste removed in the preliminary treatment of STPs, taking as reference the Monjolinho STP in São Carlos-Brazil (with service capacity of 258,000 population equivalent). To this end, we evaluated the potential use of the material removed in the primary treatment unit, as sources of energy and raw materials, focusing on underexplored topics. The following residues were studied: i) those removed in the coarse and fine screens, aiming its use as fuel; ii) the settleable material retained in the grit chambers, with the intention of using it as aggregate for mortar and non-structural concrete in construction; and, iii) the oil and grease removed, using it a feedstock for biofuel production; and the aerobic and anaerobic degradations of such material were also evaluated. For each type of waste could be verified: i) the potential of generating energy from waste removed in the screens of the sewage treatment plant, due to the relatively high results of lower calorific value ($4,837 \text{ kcal.kg}^{-1}$ for waste collected in the coarse screens and $5,059 \text{ kcal.kg}^{-1}$ for the fine screening residue) and low values regarding the generation of ash (15.91% and 9.60% for the coarse and fine screening, respectively); ii) technical, economic and environmental feasibility of the use of residual sand, removed in the grit chambers, as fine aggregate in the incorporation of mortars for coating and preparation of non-structural concrete, provided that it is submitted to cleaning and drying procedures; iii) it was not possible to obtain biodiesel from the floating material removed in the grit chambers, since this residue showed low concentration of oils and greases when compared to other raw materials and a high content of solids, largely organic in nature. Therefore, it was proved the potential for aerobic and anaerobic degradation of the floating material, resulting in the reduction of the organic load to be applied in the subsequent treatment process units.

Key words: Biodiesel. Calorific Value. Degradation. Non-structural Concrete. Preliminary treatment. Residue. Sand.Sewage Treatment. Waste recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma com classificação e responsabilidade pelo gerenciamento de cada tipo dos resíduos sólidos, segundo a lei 12.305/2010.	36
Figura 2.2 – Panorama da disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2011.	37
Figura 2.3 – Evolução dos tratamentos dos resíduos sólidos urbanos na Europa (kg per capita)	38
Figura 2.4 –Gerenciamento dos RSU ao longo dos anos nos EUA.	38
Figura 2.5 – Porcentagens das alternativas de gestão e destinação dos resíduos sólidos urbanos na Europa em 2009.	42
Figura 2.6 – Fotografia de uma peneira estática.	45
Figura 2.7 – Fotografia de uma peneira rotativa horizontal – ETE Valinhos- SP.	45
Figura 2.8 – Fotografia de uma peneira rotativa em canal – ETE Limeira- SP.	46
Figura 2.9 – Fotografia de diferentes tipos de equipamentos para a remoção de sólidos grosseiros: (a) grade retangular com limpeza manual – ETE Limeira- SP; (b). grade do tipo escada – ETE Monjolinho-SP; (c) grade do tipo cremalheira – ETE ABC- Região Metropolitana de São Paulo; (d) grade do tipo corrente transportadora – ETE Conduta Rio Claro- SP.	47
Figura 2.10 – Fluxograma da ETE Monjolinho, São Carlos-SP, para a 2ª fase	52
Figura 2.11 – Unidades e equipamento componentes do tratamento preliminar da ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.	53
Figura 2.12 – Gradeamento grosseiro da ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.	54
Figura 2.13 – Gradeamento fino da ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.	54
Figura 2.14 – Equipamentos responsáveis pela remoção da areia e gordura dos desarenadores. ETE Monjolinho SAAE São Carlos	56
Figura 2.15 – Desarenador em operação da ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.	56
Figura 2.16 – Reator de degradação de gordura Tratamento de gases gerados no tanque de degradação de gordura. ETE Monjolinho São Carlos-SP. ETE Monjolinho São Carlos-SP.	57
Figura 2.17 – Unidade experimental para a presente pesquisa, instalada na ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.	58
Figura 3.1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte- Ano 2013. Fonte: MME (2014).	66
Figura 3.2 – Ilustração da coleta dos resíduos nos gradeamento grosseiro e fino (a) modo convencional:disposição nas caçambas (b) dispositivo condutor utilizado na pesquisa.	77
Figura 3.3 – Baías para acondicionamento dos resíduos (setas vermelhas)e sistema de drenagem do percolado (setas amarelas)	78

Figura 3.4 - Composição dos resíduos removidos nos gradeamentos: (a) plástico; (b) pedra; (c) papel; (d) tecido; (e) matéria orgânica; (f) outros (espuma, alumínio)	80
Figura 3.5 - Análise estatística para as determinações de umidade e de sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis, em relação a massa de sólidos, para os resíduos removidos no gradeamento grosseiro, antes e após a operação de secagem em estufa.	84
Figura 3.6 – Análise estatística para as determinações de umidade e de sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis, em relação a massa de sólidos, para os resíduos removidos no gradeamento fino, antes e após a operação de secagem em estufa.	86
Figura 3.7 – Acompanhamento da temperatura interna na unidade experimental do tipo estufa agrícola	88
Figura 3.8 – Análise estatística das temperaturas externa e interna da unidade experimental	88
Figura 3.9 – Eficiência de redução de massa dos resíduos removidos no gradeamento grosseiro após o processo de secagem.	89
Figura 3.10 – Eficiência de redução de massa dos resíduos removidos no gradeamento fino após o processo de secagem.	89
Figura 3.11 – Caracterizações físicas dos resíduos do gradeamento grosseiro em termos de massa e de volume	95
Figura 3.12 – Caracterizações físicas dos resíduos do gradeamento fino em termos de massa e de volume	96
Figura 3.13 – Análise estatística do percentual de matéria orgânica putrescível presente nos gradeamentos grosseiro e fino	97
Figura 3.14 – Análise estatística do percentual de plástico presente nos gradeamentos grosseiro e fino.	98
Figura 3.15 – Análise estatística do percentual de papel presente nos gradeamentos grosseiro e fino.	98
Figura 3.16 – Análise estatística do percentual de tecido presente nos gradeamentos grosseiro e fino.	99
Figura 3.17 – Análise estatística do percentual de tecido presente nos gradeamentos grosseiro e fino	99
Figura 4.1 – Análise da composição das frações orgânicas e minerais retidas nas peneiras no ensaio de granulometria dos resíduos do desarenador da ETE 02 Sul Maringá-PR	108
Figura 4.2 - Desenho esquemático dos componentes de um lavador de areia.	113
Figura 4.3 – Etapas do procedimento de limpeza e secagem da areia residual: (a) Preliminar; (b) peneiramento; (c) lavagem; (d) secagem.	134
Figura 4.4 – Fluxograma dos ensaios para controle do concreto preparado com areia residual.	137

Figura 4.5 – Preparação dos corpos de provas: (a) material utilizado; (b) mistura do material; (c) e (d) Slump Test; (e) corpo de prova sendo moldado na mesa vibratória; (f) corpos de provas preparados.	138
Figura 4.6 – Prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão axial e à tração na compressão diametral.	139
Figura 4.7 – Ilustração da argamassadeira e mesa vibratória utilizadas nos ensaios: (a) argamassadeira e (b) mesa vibratória.	140
Figura 4.8 – Análise granulométrica da resíduo removido nos desarenadores.	145
Figura 4.9 – Composição das frações orgânicas e minerais retidas nas peneiras no ensaio de granulometria da areia residual antes do procedimento de limpeza e secagem.	146
Figura 4.10 – Ilustração dos materiais retidos em cada fração das peneiras utilizadas na análise granulométrica.	147
Figura 4.11 – Resíduos retidos na etapa de peneiramento do procedimento de limpeza e secagem.	150
Figura 4.12 – Monitoramento do teor de umidade ao longo do tempo de secagem na unidade experimental.	151
Figura 4.13 – Teor de Sólidos Totais Voláteis da areia residual utilizando limpeza geral e apenas a secagem.	152
Figura 4.14 – Densidades médias de Coliformes Totais na areia residual utilizando limpeza geral e apenas a secagem.	153
Figura 4.15 – Densidades médias de E.coli na areia residual utilizando limpeza geral e apenas a secagem.	153
Figura 4.16 – Análise granulométrica da areia residual após procedimento de limpeza e secagem e da areia de referência.	156
Figura 4.17 – Determinação colorimétrica de impurezas orgânicas na areia residual. Suspensão da esquerda – areia residual e suspensão da direita – padrão.	158
Figura 4.18 – Resultados dos ensaios de resistência das argamassas preparadas com substituição total e parcial da areia residual por areia de comercial comum aos 28 dias.	165
Figura 4.19 – Análises de Coliformes Totais e E.coli das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100%, após idade de 28 dias.	166
Figura 5.1 – Disposição final da espuma produzida nos reatores anaeróbios no Estado do Paraná	180
Figura 5.2 – Esquema ilustrativo dos reatores de bancada para degradação do material flutuante	198
Figura 5.3 – Ilustração da unidade experimental de bancada instalada para degradação da gordura	198

Figura 5.4 –(a) gordura acumulada no canal de coleta (b) diluição da gordura com água de reúso para auxiliar no encaminhamento da mesma ao tanque de degradação	204
Figura 5.5 – Eficiência de remoção do material flutuante para o tempo de detenção de 20 dias	206
Figura 5.6 – Volume de metano produzido nos reatores anaeróbios para os ensaios com o tempo de detenção de 5 dias	209
Figura 5.7 – Volume de metano produzido nos reatores anaeróbios para os ensaios com o tempo de detenção de 5 dias	209
Figura 5.8 – Eficiência de remoção do material flutuante para o tempo de detenção de 5 dias	213
Figura 5.9 – Eficiência de remoção do material flutuante para o tempo de detenção de 5 dias	213

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limite de emissões de unidade de recuperação energética de resíduos conforme entendimentos dos órgãos ambientais	40
Tabela 2.2 – Espaçamento entre barras da unidade de remoção de sólidos grosseiros	44
Tabela 3.1 – Quantidade de sólidos grosseiros removidos em função do espaçamento das barras	60
Tabela 3.2 – Dados médios das características e quantidades de sólidos grosseiros removidos do esgoto por meio de gradeamento	60
Tabela 3.3 – Caracterização quantitativa dos resíduos removidos nos desrenadores de duas ETEs em Maringá-PR	60
Tabela 3.4 – Características do material retido nos gradeamentos grosseiro e fino. Valores médios e valores obtidos de grades com aberturas 0,8 mm a 3,0 mm	61
Tabela 3.5 – Composição dos resíduos retidos no gradeamento	62
Tabela 3.6 – Oferta interna de energia no Brasil de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2014	65
Tabela 3.7 – Valores do Poder calorífico superior e inferior dos resíduos sólidos urbanos	71
Tabela 3.8 – Característica de lodo de estações de tratamento de esgoto	72
Tabela 3.9 – Valor médio do Poder calorífico de alguns componentes dos resíduos sólidos urbanos	73
Tabela 3.10 – Poder calorífico inferior, umidade e teor de cinzas das frações de resíduos sólidos urbanos	74
Tabela 3.11 – Plantas de incineração com geração de energia	75
Tabela 3.12 – Características dos resíduos removidos na peneira rotativa da ETE de Adelanto – CA –USA	76
Tabela 3.13 – Quantificação dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino	82
Tabela 3.14 – Informações da coleta dos resíduos removidos no gradeamento grosseiro	82
Tabela 3.15 – Informações da coleta dos resíduos removidos no gradeamento fino	83
Tabela 3.16 – Composição, expressa em teor de sólidos, dos resíduos do gradeamento grosseiro antes e após do processo de secagem em estufa agrícola durante 15 dias	83
Tabela 3.17 – Composição, expressa em teor de sólidos, dos resíduos do gradeamento fino antes e após do processo de secagem	85
Tabela 3.18 – Caracterização do percolado produzido durante o processo de secagem dos resíduos do gradeamento grosseiro e fino	90
Tabela 3.19 – Poder calorífico e teores de sólidos e cinzas dos resíduos removidos nos gradeamentos	91
Tabela 3.20 – Produção de energia e cinzas no processo de queima dos resíduos removidos nos gradeamentos	92

Tabela 3.21 – Resumo do balanço para aproveitamento dos resíduos removidos no gradeamento da ETE Monjolinho	93
Tabela 4.1 – Quantificação de areia segundo várias referências de literatura	105
Tabela 4.2 – Dados da quantificação de areia, obtidos de levantamento feito em vinte e duas ETEs dos Estados Unidos, que recebem esgoto de sistema de coleta do tipo separador absoluto	105
Tabela 4.3 – Caracterização quantitativa dos resíduos removidos nos desarenadores de duas ETEs em Maringá-PR	106
Tabela 4.4 – Caracterização qualitativa dos resíduos removidos nos desarenadores de três ETEs do Paraná	107
Tabela 4.5 – Análises microbiológicas e teor de unidade do resíduo do desarenador removido nos desarenadores das ETEs Bandeirantes e Marcílio de Noronha, localizadas em Vitória -ES	107
Tabela 4.6 – Distribuição granulométrica dos resíduos removidos nos desarenadores de ETEs da região litorânea do Estado de São Paulo, ensaios realizados em Janeiro de 2009	109
Tabela 4.7 – Análises físico-químicas do extrato solubilizado dos resíduos do desarenador removido nos desarenadores de três ETEs do Estado do Paraná	110
Tabela 4.8 – Análises físico-químicas do extrato lixiviado dos resíduos do desarenador removido nos desarenadores de três ETEs do Estado do Paraná	111
Tabela 4.9 – Análises microbiológicas para os diferentes métodos de higienização do resíduo removido no desarenador	115
Tabela 4.10 – Resultados dos parâmetros Coliformes Totais, <i>E.coli</i> , Ovos de Helminthos, umidade e pH dos resíduos removidos no desarenador utilizando diferentes dosagens de cal	116
Tabela 4.11 – Concentração máxima de micro-organismos em areia de praia usando metodologia de membrana filtrante (MF) ou tubos múltiplos	118
Tabela 4.12 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	119
Tabela 4.13 – Correlação entre o ensaio de abatimento e trabalhabilidade	121
Tabela 4.14 – Propriedades de agregados de concreto reciclado da construção civil	124
Tabela 4.15 – Classificação de argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005)	127
Tabela 4.16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial para idades de 7; 14 e 28 dias	130
Tabela 4.17 – Características e propriedades físicas do concreto	131
Tabela 4.18 – Normas utilizadas nos ensaios com os corpos de prova	139

Tabela 4.19 – Quantificação dos resíduos sedimentáveis removidos por mês, no desarenador	143
Tabela 4.20 – Caracterização qualitativa dos resíduos removidos no desarenador da ETE Monjolinho São Carlo -SP	144
Tabela 4.21 – Caracterização do percolado produzido durante o processo de limpeza e secagem dos resíduos removidos nos desarenadores	149
Tabela 4.22 – Resultados da etapa de peneiramento utilizada no procedimento de limpeza e secagem da areia	149
Tabela 4.23 – Caracterização dos resíduos produzidos após lavagem com água e com e sem adição da solução de hipoclorito de sódio	151
Tabela 4.24 – Determinações da areia residual após procedimento de limpeza e secagem e da areia de referência	155
Tabela 4.25 – Características dos agregados utilizados na confecção dos corpos de prova	157
Tabela 4.26 – Resultados dos ensaios de resistência na compressão axial e à tração na compressão diametral dos corpos de provas confeccionados com 100% de areia residual e areia de referência aos 28 e 91 dias	159
Tabela 4.27 – Resultados dos ensaios de absorção de água dos corpos de provas confeccionados com areia residual e areia de referência aos 28 e 91 dias	160
Tabela 4.28 – Resultados dos ensaios de lixiviação dos corpos de provas confeccionados com areia residual e areia de referência aos 28 dias	160
Tabela 4.29 – Resultados dos ensaios de solubilização dos corpos de provas confeccionados com areia residual e areia de referência aos 96 dias	162
Tabela 4.30 – Resultados dos ensaios de resistência dos corpos de provas confeccionados com substituição total e parcial da areia comercial por areia residual comum aos 28 dias	164
Tabela 4.31 – Resultados dos ensaios de lixiviação das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100% aos 28 dias	166
Tabela 4.32 – Resultados dos ensaios de solubilização das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100% aos 28 dias	168
Tabela 4.33 – Parâmetros superiores aos valores máximos no extrato solubilizado para as argamassas aos 28 dias	169
Tabela 4.34 – Custo operacional para aproveitamento da areia residual na ETE Monjolinho São Carlos-SP	170
Tabela 4.35 – Custo de implantação para aproveitamento da areia residual na ETE Monjolinho São Carlos-SP	170

Tabela 4.36 – Custo total para aproveitamento da areia residual na ETE Monjolinho São Carlos-SP	171
Tabela 4.37 – Comparação entre possíveis alternativas para areia removidas na ETE Monjolinho: aproveitamento e disposição em aterros em R\$.mês ⁻¹	171
Tabela 5.1 – Valores de concentração de substâncias “oleosas e gordurosas” presentes em esgoto sanitário, em algumas estações de tratamento de esgoto, no Brasil	176
Tabela 5.2 – Valores de concentração de substâncias “oleosas e gordurosas” presentes em esgoto sanitário das Estações de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo	176
Tabela 5.3 – Eficiência de remoção dos raspadores de espuma de desarenadores aerados	177
Tabela 5.4 – Características da espuma removida nos desarenadores aerados de ETEs	178
Tabela 5.5 – Características físico-químicas e coeficientes de acumulação de espuma em reatores UASB tratando esgoto sanitário	179
Tabela 5.6 – Características dos reatores aeróbios de degradação de espuma removida nos desarenadores aerados de ETEs	183
Tabela 5.7 – Dados operacionais dos reatores aeróbios de degradação de espuma removida nos desarenadores aerados de ETEs	183
Tabela 5.8 – Matérias-primas que podem ser utilizadas para obtenção do biodiesel: origens e formas de obtenção	184
Tabela 5.9 – Composição média dos ácidos graxos que compõem gorduras de caixa de gordura e espuma de esgoto	185
Tabela 5.10 – Valores médios da caracterização físico-química dos resíduos oleosos	186
Tabela 5.11 – Resultados da produção de biodiesel após 4 horas de esterificação ácida dos óleos e graxas residuais, produzida em atividades de saneamento	190
Tabela 5.12 – Características e especificação do biodiesel, segundo ANP	193
Tabela 5.13 – Qualidade do biodiesel produzida a partir de caixa de gordura de esgoto da ETE	194
Tabela 5.14 – Caracterização do material flutuante: variáveis e métodos de análises	195
Tabela 5.15 – Parâmetros analisadas e métodos de análises	196
Tabela 5.16 – Caracterização do material flutuante removido nos desarenadores	201
Tabela 5.17 – Resultado da caracterização físico-química dos óleos extraídos do material flutuante removido nos desarenadores	201
Tabela 5.18 – Caracterização físico-química do material produzido na reação de esterificação	203
Tabela 5.19 – Resultados do ensaio realizado com tempo de detenção de 20 dias	205
Tabela 5.20 – Resultados da biodegradação anaeróbio do material flutuante para o tempo de detenção de 5 dias	207

Tabela 5.21 – Resultados da biodegradação anaeróbio do material flutuante para o tempo de detenção de 10 dias	208
Tabela 5.22 – Resultados da biodegradação aeróbio do material flutuante para o tempo de detenção de 5 dias	211
Tabela 5.23 – Resultados da biodegradação aeróbio do material flutuante para o tempo de detenção de 10 dias	212

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Resistência potencial de aderência à tração [MPa]
A/C	Relação água cimento
ABC	Santo André, São Bernardo e São Caetano
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREPLE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AC	Areia Comercial
AGL	Ácidos Graxos Livres
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APHA	American Public Health Association
AR	Areia Residual
Art.	Artigo
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Österreich (Áustria)
AWWA	American Water Works Association
BA	Estado da Bahia - Brasil
BA	Република Босна и Херцеговина (Bósnia e Herzegovina)
BE	België /Belgique /Belgien (Bélgica)
BG	България (Bulgária)
BS	British Standards
BX	Mistura óleo diesel-biodiesel
C	Coeficiente de capilaridade [$\text{g dm}^{-2}\text{min}^{-1/2}$]
CA	Estado da Califórnia – Estados Unidos
Cd	Cádmio
CH	Confœderatio Helvetica (Suíça)
CH ₄	Metano
CLE	Cinzas do Lodo de Esgoto
CM	Concentração do poluente determinada na amostra
CODESC	Companhia de Desenvolvimento do Estado de Santa Catarina
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CR	Concentração do poluente corrigida para a condição estabelecida
CZ	Česká republika (República Checa)
CY	Κύπρος (Chipre)
C14:0	Ácido Mirístico
C16:0	Ácido Palmítico
C18:0	Ácido Esteárico
C18:1	Ácido Oleico
C18:2	Ácido Linoleico
C18:3	Ácido Linolênico
D	Densidade de massa no estado fresco [kg m ⁻³]
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio [mg O ₂ . L ⁻¹]
DQO	Demanda Química de Oxigênio [mg O ₂ . L ⁻¹]
DE	Deutschland (Alemanha)
DK	Danmark (Dinamarca)
ECG-ETE	Escuma da Caixa de Gordura da Estação de Tratamento de Efluente
ECG-IND	Escuma da Caixa de Gordura de uma Indústria de Alimentos
ECG-RU	Escuma da Caixa de Gordura do Restaurante Universitário
EE	Eesti (Estónia)
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EL	Ελλάδα (Grécia)
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ES	Estado do Espírito Santo – Brasil
ES	España (Espanha)
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estações de Tratamento de Esgoto
EU	European Union
EU28	European Union (28 Countries)
EUA	Estados Unidos da America
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente

FI	Suomi/Finland (Finlândia)
FR	France (França)
f_{ck}	resistência característica do concreto à compressão [MPa]
f_{cm}	média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos de prova ensaiados [MPa]
f_{ctk}	resistência característica do concreto à tração [MPa]
GEE	Gases do efeito estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GO	Estado de Goiás - Brasil
HCL	Ácido Clorídrico
HF	Ácido Fluorídrico
Hg	Mercúrio
HR	Hrvatska (Croácia)
HU	Magyarország (Hungria)
H ₂ O	Água
H ₂ S	Ácido Sulfídrico
HS ⁻¹	Íon sulfídrico
IE	Éire (Irlanda)
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	Internacional Organization for Standardization
IS	Ísland (Islândia)
IT	Italia (Itália)
IVIG	Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais
LD	Limite de Detecção
LT	Lietuva (Lituânia)
Ltda	Limitada
LTFS	Lodos de Tanques e Fossas Sépticas
LV	Latvija (Letônia)
LU	Luxembourg (Luxemburgo)
M	Densidade de massa aparente no estado endurecido [kg m ⁻³]
MF	Membrana Filtrante
MK	Македонија (Macedónia)
MME	Ministério de Minas e Energia

MOt	Análise da fração orgânica
MP	Material particulado
MS	Estado do Mato Grosso do Sul – Brasil
MT	Malta
N.A	Não se Aplica.
NBR	Norma Brasileira
NaOH	Hidróxido de Sódio
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺	Íon amônio
NL	Nederland (Países Baixos)
NO	Kongeriket Norge (Noruega)
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl [mg N. L ⁻¹]
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O&G	Óleos e Graxas
OM	Percentagem de oxigênio medido durante a amostragem
OR	Percentagem de oxigênio de Referência
P	Resistência à compressão [MPa]
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PE	Estado do Pernambuco - Brasil
PET	Polietileno Tereftalato
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PL	Polska (Polónia)
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PR	Estado do Paraná - Brasil
PROINFA	Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica
P-Total	Fósforo Total [mg P. L ⁻¹]
PT	Portugal
PVC	Policloreto de vinila
R	Resistência à tração na flexão [MPa]
RJ	Estado do Rio de Janeiro - Brasil

RMt	Análise da fração mineral
RO	România (Roménia)
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RS	Србија (Sérvia)
s	Desvio padrão para o conjunto de corpos de prova ensaiados
SAAE	Sistema Autônomo de Água e Esgoto
SANASA	Setor de Operação de Esgoto da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Estado do Paraná
SD	Secure Digital
SE	Sverige (Sérvia)
SEREC	Serviços Engenharia Consultiva
SK	Slovensko (Eslováquia)
SI	Slovenija (Eslovénia)
SMA	Secretaria do Meio Ambiente
STPs	Sewage treatment plants
SP	Estado de São Paulo- Brasil
ST	Sólidos Totais
STV	Sólidos Totais Voláteis
SOx	Óxidos de Enxofre
TA	Tanque de Aeração
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
Ti	Titânio
TR	Türkiye (Turquia)
U	Retenção de água [%]
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
U ₃ O ₈	Óxido de Tri-Urânio
UFC	Unidade Formadora de Colônia
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UK	United Kingdom (Reino Unido)
USA	United States of América
USEPA	United States Environmental Protection Agency
USP	Universidade de São Paulo

WEF	Water Environment Federation
WTE	Waste to Energy
WWF	World Wide Fund for Nature
WWTP	Wastewater Treatment Plant
ρ_s	Densidade [kg.m ⁻³]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	31
1.1. Considerações iniciais	31
1.2. Contexto e Justificativa do trabalho	31
1.3. Objetivos.....	32
1.4. Estrutura do Trabalho	33
2. REMOÇÃO DE RESÍDUOS EM TRATAMENTO PRELIMINAR	35
2.1. Considerações iniciais	35
2.2. Resíduos sólidos e sua destinação final.....	35
2.3. Tratamento Preliminar em Estação de Tratamento de Esgoto	42
2.3.1. Gradeamento	43
2.3.2. Desarenadores	47
2.4. Aproveitamento dos resíduos removidos no tratamento preliminar de ETEs	49
2.5. ETE Monjolinho	51
2.5.1. Descrição geral.....	51
2.5.2. Tratamento Preliminar.....	53
2.5.3. Unidade experimental – Estufa do tipo agrícola construída especialmente para a presente pesquisa	57
3. APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS REMOVIDOS NO GRADEAMENTO	59
3.1. Levantamento Bibliográfico	59
3.1.1. Generalidades	59
3.1.2. Caracterização dos resíduos removidos no gradeamento.....	59
3.1.3. Composição dos resíduos do gradeamento	61
3.1.4. Tratamento e disposição dos resíduos do gradeamento	62
3.1.5. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos	64
3.1.5.1. <i>Considerações Iniciais</i>	64
3.1.5.2. <i>Panorama energético brasileiro</i>	64
3.1.5.3. <i>Tecnologias para Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos</i>	67
3.2. Material e Métodos	77
3.2.1. Resíduos dos gradeamentos grosseiro e fino.....	77
3.2.2. Análise Estatística	81

3.3.	Resultados	81
3.4.	Conclusões	100
4.	APROVEITAMENTO DO MATERIAL SEDIMENTÁVEL REMOVIDO EM DESARENADOR.....	103
4.1.	Levantamento Bibliográfico	103
4.1.1.	Generalidades	103
4.1.2.	Caracterização do material sedimentável removido nos desarenadores	103
4.1.3.	Tratamento e disposição do material sedimentável removido nos desarenadores	111
4.1.4.	Legislação para aproveitamento da areia removida nos desarenadores de ETEs.....	117
4.1.5.	Características do Concreto	119
4.1.6.	Características da argamassa	125
4.1.7.	Utilização de resíduos na construção civil.....	127
4.2.	Material e Métodos	132
4.2.1.	Generalidades	132
4.2.2.	Coleta e amostragem do material sedimentável	132
4.2.3.	Procedimento de limpeza e secagem da areia residual	133
4.2.4.	Ensaio e determinações com a areia, após procedimento de limpeza e secagem	135
4.2.4.1.	<i>Ensaio do Concreto</i>	135
4.2.4.2.	<i>Ensaio Argamassa</i>	139
4.2.5.	Análise econômica do aproveitamento da areia removida nos desarenadores de ETEs	141
4.3.	Resultados e Discussão	142
4.3.1.	Caracterização do resíduo removido nos desarenadores de ETEs.....	142
4.3.2.	Procedimento de limpeza e secagem da areia residual	148
4.3.3.	Ensaio e determinações com a areia, após procedimento de limpeza e secagem	155
4.3.4.	Ensaio com corpos de provas de concreto	158
4.3.5.	Ensaio das Argamassas	165
4.3.6.	Análise econômica do aproveitamento da areia removida nos desarenadores de ETEs	169
4.4.	Conclusões	172
5.	MATERIAL FLUTUANTE REMOVIDO NOS DESARENADORES	175
5.1.	Revisão Bibliográfica.....	175

5.1.1.	Caracterização do material flutuante removida no desarenador	175
5.1.2.	Possibilidade aproveitamento do material flutuante	181
5.1.2.1.	<i>Generalidades</i>	181
5.1.2.2.	<i>Biodegradação do material flutuante</i>	181
5.1.2.3.	<i>Biodiesel</i>	183
5.2.	Material e Métodos	195
5.2.1.	Generalidades	195
5.2.2.	Aproveitamento do material flutuante para produção de biodiesel.....	195
5.2.3.	Degradação de material flutuante.....	197
5.3.	Resultados.....	200
5.3.1.	Caracterização do material flutuante	200
5.3.2.	Aproveitamento do material flutuante para produção de biodiesel.....	201
5.3.3.	Degradação biológica do material flutuante removido nos desarenadores	203
5.3.3.1.	<i>Dificuldades gerais</i>	203
5.3.3.2.	<i>Ensaio preliminares dos tratamentos biológicos</i>	205
5.3.3.3.	<i>Ensaio experimentais</i>	206
5.4.	Conclusões.....	214
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	215
6.1.	Conclusões.....	215
6.2.	Recomendações para trabalhos futuros	217
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	219

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados o contexto no qual se insere esta pesquisa, as justificativas que motivaram a sua realização, os objetivos propostos e a forma de organização deste texto.

1.2. Contexto e Justificativa do trabalho

Mesmo com o alto nível de tecnologia envolvido nos processos e operações que compõem as estações de tratamento de esgoto (ETE), a destinação final dos resíduos removidos no tratamento preliminar de ETE ainda carece de estudos, tanto no que diz respeito a novas pesquisas quanto em projetos; visando, principalmente, à utilização dos subprodutos passíveis de aproveitamento como matéria-prima ou como fonte de energia.

No Brasil, a prática comum no que se refere ao descarte dos resíduos retidos nas unidades do tratamento preliminar é a de dispô-los no próprio terreno da estação (enterramento ou empilhamento) ou encaminhá-los para aterros sanitários e “lixões”. De forma geral, não há preocupação relacionada às potencialidades associadas ao seu aproveitamento direto, redução ou recuperação do material gerado e impactos ambientais. A disposição em aterros brasileiros, além do custo inerente ao transporte e ao manuseio, ocupa volume que poderia ser efetivamente destinado aos resíduos sólidos domésticos. Também deve ser considerada a análise integrada da viabilidade ambiental, técnica, operacional e econômica do aproveitamento dos resíduos, em que se insere o termo desenvolvimento sustentável em ETEs, visando *“ao atendimento das necessidades da atual geração, sem comprometer a capacidade das futuras gerações em prover suas próprias demandas.”*.

Na operação de unidades de tratamento preliminar de ETEs, quantidades significativas de resíduos são removidas, incluindo sólidos grosseiros, areia e óleos e graxas. A capacidade potencial de geração de energia a partir desses subprodutos, bem como a possibilidade de utilizá-los como matéria-prima para diferentes fins, são premissas ainda não ponderadas com profundidade, inclusive, a produção de biocombustível tendo como insumo, óleos e graxas retidos no tratamento preliminar.

Nesse contexto, o presente projeto tem como enfoque principal o estudo da composição, tratamento e disposição final de resíduos removidos no tratamento preliminar de

uma ETE em operação, visando o aproveitamento desses materiais como fonte de energia e como matéria-prima, com consequente mitigação de impactos decorrentes da sua disposição. Para tanto, avaliou-se: i) o poder calorífico do material retido no gradeamento, com uso potencial em fornalhas de secadores de lodo; ii) o possível aproveitamento da areia removida como agregado em concreto não estrutural; iii) a possibilidade de geração de biocombustível a partir do material gorduroso; iv) a capacidade de geração de biogás combustível oriundo da degradação anaeróbia desse resíduo.

Além disso, buscaram-se subsídios complementares para avaliar os benefícios técnico, econômico e ambiental decorrentes do aproveitamento desses resíduos, em comparação com as formas usuais praticadas no Brasil, considerando-se: i) que o custo para disposição adequada do material retido no gradeamento e peneiramento em aterros sanitários é elevado; ii) o material “gorduroso” é deletério e oneroso para o tratamento em ETEs – seu aproveitamento pode reduzir custos operacionais e pode resultar em algum retorno financeiro; iii) ao se aproveitar a areia removida, além de se mitigar danos ambientais por sua disposição inadequada, pode-se reduzir impactos decorrentes da extração de areia em rios a ser destinado à construção civil; iv) o aprimoramento do tratamento preliminar, como implantação de unidades para degradação do material flutuante, reduz cargas aplicadas nas unidades subsequentes das ETEs e reduz problemas decorrentes de corrosão pela presença de gorduras e hidrocarbonetos. Somado a isso, a degradação anaeróbia produz biogás, que pode ser aproveitado na própria estação.

Cabe comentar que a pesquisa visou atender um dos objetivos previstos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que é o incentivo ao desenvolvimento de sistema de gestão ambiental e empresarial voltadas para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético. Além de atender a ordem de prioridade estabelecida no Art. 9º da referida lei: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. De acordo com esta ordenação básica, todos os resíduos deverão ser reaproveitados e/ou tratados e somente os rejeitos desses processos poderão ser dispostos em aterros sanitários.

1.3. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi demonstrar o elevado potencial de aproveitamento dos resíduos removidos no tratamento preliminar de estações de tratamento de

esgoto como fonte de energia e de material para reúso. Tomou-se como referência a ETE Monjolinho de São Carlos-SP (com capacidade para atender 258.000 habitantes) que possui sistema preliminar destinado à remoção de resíduos grosseiros, sedimentáveis e flutuantes. Para isso, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- i. Quantificação e classificação dos resíduos retidos nos gradeamentos no que tange a questão do potencial energético;
- ii. Quantificação e classificação dos resíduos retidos nos desarenadores, visando a seu aproveitamento como matéria-prima na construção civil;
- iii. Avaliação da potencialidade de se efetuar a degradação do material flutuante por processo anaeróbio ou aeróbio;
- iv. Avaliação da potencialidade de produzir biocombustível a partir da gordura removida no tratamento preliminar da estação;
- v. Avaliação da potencialidade de produzir biogás a partir da degradação anaeróbia do material flutuante removido;
- vi. Comparação, sob os aspectos técnico, econômico, operacional e ambiental, da proposta do aproveitamento do material sedimentável removido no desarenador, em relação aos procedimentos vigentes no país.

1.4. Estrutura do Trabalho

Como o objetivo principal deste trabalho é o aproveitamento de diferentes tipos de resíduos removidos no tratamento preliminar de estação de tratamento de esgoto, optou-se pela segregação em capítulos visando a uma abordagem mais detalhada, face a especificidade de cada resíduo estudado e sua finalidade de aproveitamento. Dessa forma, esta tese está organizada em sete capítulos, apresentados da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Neste capítulo, busca-se a contextualização do tema proposto nesta pesquisa, enfatizando a necessidade de avaliar a potencialidade de aproveitamento dos resíduos removidos no tratamento preliminar de ETEs como fonte de energia e matéria-prima na construção civil.
- Capítulo 2 – Apresenta alguns conceitos básicos sobre os resíduos sólidos e o tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto. Além disso, para facilitar o entendimento do conteúdo dos capítulos seguintes, embora em desacordo com a formalidade de textos de teses, incluiu-se neste capítulo uma abordagem sobre a ETE

de referência e as instalações experimentais, de campo, que foram utilizadas nesta pesquisa – que se relaciona com os conteúdos dos capítulos seguintes.

- Capítulo 3 – Trata-se ao estudo da potencialidade de aproveitamento dos resíduos removidos nas unidades de gradeamento da ETE. Neste capítulo, apresentam-se, também, as conclusões específicas.
- Capítulo 4 – Este capítulo apresenta a avaliação e viabilidade da utilização da areia removida em desarenador de ETE como agregado miúdo na construção civil, assim como as conclusões sobre os resultados obtidos.
- Capítulo 5 – Trata das possíveis alternativas para gerenciamento da gordura removida em ETEs: tratamento biológico e uso na produção de biodiesel. A discussão dos resultados e suas conclusões, também são apresentadas.
- Capítulo 6 – Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas e realizada algumas considerações finais.
- Capítulo 7 - Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração do presente trabalho.

2. REMOÇÃO DE RESÍDUOS EM TRATAMENTO PRELIMINAR

2.1. Considerações iniciais

Este capítulo visa à contextualização do tema proposto na pesquisa. Inicialmente, apresentam-se alguns conceitos sobre resíduos sólidos, sua classificação e destinação final e sobre o tratamento preliminar, com enfoque nas unidades de gradeamento e desarenação. A seguir, destacam-se os resíduos removidos no tratamento preliminar, enfatizando a necessidade de avaliar sua potencialidade de aproveitamento como fonte de energia e matéria-prima.

Por fim, apresenta-se a descrição da estação de tratamento de esgoto onde foi desenvolvida a pesquisa, com destaque para o tratamento preliminar, assim como da pequena edificação (e seus componentes) utilizada para parte experimental desta pesquisa.

2.2. Resíduos sólidos e sua destinação final

A Lei 12.305/2010, que foi regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (incluindo os perigosos) às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Essa Lei, que não se aplica aos rejeitos radioativos (são regulados por legislação específica), apresenta a seguinte definição para os resíduos sólidos:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Segundo a referida lei, os resíduos sólidos são classificados em onze tipos: de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; sólidos urbanos, compreendendo os domiciliares e de limpeza urbana; de serviços de transporte; de serviços públicos de saneamento básico; da construção civil; industriais; de serviços de saúde; agrossilvopastoris; e

de mineração. Na Figura 2.1 está apresentado fluxograma com a classificação e a responsabilidade pelo gerenciamento de cada tipo de resíduo sólido gerado.

Figura 2.1 – Fluxograma com classificação e responsabilidade pelo gerenciamento de cada tipo dos resíduos sólidos, segundo a lei 12.305/2010.

Os resíduos sólidos, escopo da pesquisa, são classificados como resíduos de serviços públicos de saneamento básico, os quais se referem àqueles gerados nas atividades de drenagem pluvial, abastecimento de água e esgotamento sanitário.

No caso da presente pesquisa, os resíduos de serviços públicos de saneamento básico referem-se aos removidos nas unidades do tratamento preliminar de ETEs (gradeamentos e desarenadores), envolvendo os sólidos grosseiros, areia e óleos e graxas. No Brasil, a maioria das estações lança este tipo de resíduo em aterros sanitários e “lixões”, sem a preocupação com reúso, redução, recuperação e impactos ambientais.

O Art. 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece que na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Também é prevista a utilização de tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos, que sejam comprovadamente seguras nos âmbitos

operacionais, ambientais e ocupacionais. De acordo com esta ordenação básica, todos os resíduos deverão ser reaproveitados e/ou tratados e somente os rejeitos desses processos poderão ser dispostos em aterros sanitários.

É importante ressaltar que a regularização da disposição final de resíduos é uma imposição legal que deveria estar em curso até o ano 2014, sob pena de aplicação da Lei de Crimes Ambientais (Lei 9.605/98, regulamentada pelo Decreto nº 6.514/08). Portanto, sua regularização apresenta-se como grande desafio a ser superado no Brasil, tendo em vista o elevado percentual de inadequação: 42% de resíduos dispostos em lixões e aterros controlados, conforme pode ser visualizado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Panorama da disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2011.

Fonte: Abrelpe (2011).

A Lei 12.305/10 prevê que os materiais passíveis de reaproveitamento, reciclagem ou tratamento por tecnologias economicamente viáveis (como resíduos recicláveis ou orgânicos) não devem mais ser encaminhados para a disposição final. Portanto, apenas os rejeitos, que são os resíduos em relação ao qual já foram esgotadas as possibilidades de tratamento e recuperação pelos meios e processos tecnológicos conhecidos, podem ser dispostos em aterros sanitários.

A tendência mundial tem sido a diminuição dos aterros e o aumento de outras formas de destinação dos resíduos como incineração, reciclagem, compostagem, dentre outros, conforme pode ser visualizado nas Figuras 2.3 e 2.4.

Figura 2.3– Evolução dos tratamentos dos resíduos sólidos urbanos na Europa (kg per capita)

Fonte: Eurostat (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Municipal_waste_statistics)

Figura 2.4–Gerenciamento dos RSU ao longo dos anos nos EUA.

Fonte: USEPA (2013).

De acordo com a Figura 2.3, na Europa houve redução de 33% da quantidade de aterros sanitários e aumento de outras formas de destinação, como o tratamento térmico que teve um incremento de 34%, os processos alternativos e compostagem que subiram 102% e a reciclagem com aumento de 54%.

Verifica-se na Figura 2.4, que a utilização dos aterros nos EUA começou a ser reduzida de forma gradativa, principalmente pelo surgimento e crescimento da incineração, como também pelo aumento da prática de reciclagem e da compostagem. As porcentagens das formas de destinação final dos resíduos sólidos urbanos em 2011 foram: 53,6% em aterros sanitários, 34,7% em reciclagem e 11,7% em incineração.

A recuperação energética está prevista como uma das alternativas de destinação ambientalmente adequada de resíduos na Política Nacional dos Resíduos Sólidos, e é uma alternativa eficaz no que diz respeito aos benefícios ambientais decorrentes da menor necessidade de disposição de resíduos em aterros e diminuição de gases de efeito estufa. Deste modo, contribui para o desenvolvimento sustentável, aliando os benefícios econômicos obtidos com a geração de energia através de um insumo alternativo e renovável.

A recuperação energética é utilizada para denominar os métodos e processos industriais que permitem recuperar parte da energia contida nos resíduos sólidos; sua eficiência depende diretamente das características dos resíduos (composição, poder calorífico, umidade, dentre outras). Os métodos mais empregados utilizam a incineração e, com o calor obtido, gera-se vapor e/ ou energia elétrica que pode ser novamente aproveitada pela sociedade.

As principais características dessa tecnologia são (ABRELPE e PLASTIVIDA, 2012):

- Possibilita a produção de vapor e energia elétrica em condição de melhor eficiência, comparativamente a outros métodos de disposição de resíduos;
- Permite tratar os resíduos na condição em que são coletados;
- Proporciona grande redução de volume e massa dos resíduos após tratamento (90 e 75%, respectivamente), aumentando a vida útil dos aterros;
- Otimiza a logística de transporte;
- É uma solução de saneamento básico, onde são evitados os efeitos indesejáveis característicos da disposição inadequada de resíduos em lixões e aterros controlados, tais como, transmissão de doenças, geração de gás metano, formação de efluentes líquidos, contaminação do solo e lençóis d'água, odores indesejáveis, ocupação indevida do solo e passivos ambientais significativos;
- É uma solução que gera empregos diretos e indiretos qualificados e pode agregar benefícios sociais locais quando integrada com plantas de triagem e reciclagem, gerando empregos adicionais;
- É consistente com os objetivos e diretrizes da PNRS.

Dentre as principais desvantagens da incineração, citam-se (SABIÁ *et al.*, 2005):

- Inviabilidade com resíduos de menor poder calorífico e com alta umidade;
- Metais tóxicos podem ficar concentrados na cinza;
- Geração de poluentes atmosféricos como metais pesados e compostos orgânicos como dioxina e furano;
- Altos custos de implantação, operação e manutenção.

Antes de serem lançados na atmosfera, os gases decorrentes do processo de combustão no processo de recuperação energética deverão ser tratados de forma a assegurar o cumprimento dos limites de emissão dos poluentes. No caso do Brasil, os limites de emissões estão determinados por resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Alguns estados, no âmbito de sua competência, já determinaram limites mais restritivos do que os nacionais, como é o caso da Resolução SMA 079/2009 do Estado de São Paulo que estabeleceu exigências e parâmetros ambientais para o licenciamento e funcionamento seguro de unidades de recuperação energética. Na Tabela 2.1 estão apresentados os limites estipulados em algumas legislações que tratam do controle de emissões geradas em unidades de recuperação energética de resíduos.

Tabela 2.1 – Limite de emissões de unidade de recuperação energética de resíduos conforme entendimentos dos órgãos ambientais

Parâmetro	Unidade	Base seca 11% O ₂			
		EPA*	EU	CONAMA*	SMA
		(i)	(ii)	(iii)	(iv)
Material Particulado (MP)	mg N m ⁻³	14	10	50	10
óxidos de nitrogênio (NO _x)	mg N m ⁻³	150	200	400	200
óxidos de enxofre (SO _x)	mg N m ⁻³	64	50	200	50
Ácido Clorídrico (HCL)	mg N m ⁻³	14	10	57	10
Monóxido de Carbono (CO)	mg N m ⁻³	93	50	89	50
Mercúrio (Hg)	mg N m ⁻³	0,04	0,05	–	0,05
Cádmio (Cd) e Titânio (Ti)	mg N m ⁻³	0,01	0,05	–	0,05
Ácido Fluorídrico (HF)	mg N m ⁻³	–	1	3,6	3,57
Dioxinas e Furanos	mg N m ⁻³	0,19	0,1	0,4	0,36

Fonte: Abrelpe e Plastivida (2012).

Notas:

- (i) EPA 40 CFR Part 40 (Agência Ambiental Norte Americana)
- (ii) EU 2007/07/CE (Comunidade Europeia)

- (iii) CONAMA 316/2002 (Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasil)
- (iv) SMA 079/2009 (Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Brasil)

* Valores originais a 7% O₂, convertidos para 11% O₂, para efeito de comparação.

$$C_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} \times C_M. \text{ Em que:}$$

CR - Concentração do poluente corrigida para a condição estabelecida nesta Resolução;

OR - Percentagem de oxigênio de Referência, conforme esta Resolução; estabelecida para cada fonte fixa de emissão,

OM - Percentagem de oxigênio medido durante a amostragem;

CM - Concentração do poluente determinada na amostra.

Segundo os pesquisadores membros do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), várias tecnologias para gestão de resíduos estão maduras e têm sido implementadas com sucesso há décadas em vários países. Aterros sanitários com recuperação de metano e tratamento do lixiviado podem trazer reduções diretas nas emissões de gases do efeito estufa (GEE). Além disso, a geração de GEE pode ser consideravelmente evitada por meio de processos de compostagem aeróbia e tratamento térmico, tal como a incineração com recuperação energética (ABRELPE e PLASTIVIDA, 2012).

Estudos recentes demonstram uma tendência clara no sentido de combinação das várias alternativas de gestão e destinação de resíduos sólidos como única medida para solução dos problemas atualmente enfrentados e com vistas à mitigação dos efeitos oriundos do processo de mudanças climáticas com redução das emissões de GEE, cenário no qual o setor de resíduos tem potencial de desempenhar papel de grande relevo.

Na Figura 2.5 apresentam-se as porcentagens das principais alternativas de gestão e destinação dos resíduos sólidos urbanos na Europa. Nota-se que os países que mais reduziram a dependência do aterro sanitário têm as maiores taxas de reciclagem, e tem alcançado esta meta combinando reciclagem mecânica (triagem), orgânica (compostagem) e energética (e.g. Alemanha -DE, Países Baixos -NL, Áustria-AT e Suécia- SE).

Figura 2.5– Porcentagens das alternativas de gestão e destinação dos resíduos sólidos urbanos na Europa em 2012.

Fonte: Eurostat (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Municipal_waste_statistics).

2.3. Tratamento Preliminar em Estação de Tratamento de Esgoto

O tratamento preliminar consiste na remoção de sólidos grosseiros, areia e gordura, mediante operações físicas de gradeamento, peneiramento, sedimentação e retenção; na degradação de óleos, graxas, e sólidos flutuantes (escuma) pelo tratamento biológico (reator de degradação de gordura); e no tratamento adequado dos gases produzidos nessas unidades.

Conforme descrição da *Water Environment Federation* (1998), os equipamentos e unidades do tratamento preliminar devem atender a três requisitos básicos: remover os sólidos grosseiros; proteger equipamentos e tubulações contra entupimentos e obstruções; e melhorar o desempenho das unidades de processo a jusante, atenuando picos de vazões, carga orgânica ou ambos (PRADO, 2006).

O tratamento preliminar é a primeira “barreira” nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), sendo essencial para o sucesso das próximas etapas, pois permite a proteção dos dispositivos de transporte e de tratamento do esgoto, tais como: bombas, tubulações, raspadores, removedores, aeradores, etc. Dessa forma, promove-se a diminuição do acúmulo de gordura nas unidades, atenuação de problemas de corrosão e incrustação, prevenindo odores desagradáveis e o mau funcionamento desses dispositivos e remove parcialmente a carga poluidora, contribuindo para melhorar o desempenho das unidades subsequentes.

Na sequência é apresentada uma abordagem sucinta sobre gradeamento e desarenação do tratamento preliminar.

2.3.1. Gradeamento

O gradeamento é uma das mais antigas operações utilizadas na remoção de sólidos de grandes dimensões, tais como: pedaços de tecido, papel, plásticos, metais, madeira, restos vegetais, animais mortos, ossos, dentre outros, os quais podem prejudicar ou interferir na operação de bombas e equipamentos das estações de tratamento.

O gradeamento é a operação pela qual são retidos e removidos o material flutuante e a matéria em suspensão com dimensões maiores que as aberturas das grades. Segundo Jordão e Pessoa (2005) as principais características da unidade de remoção de sólidos grosseiros são:

- Espaçamento das barras: as grades costumam ser classificadas em grosseiras, médias e finas. Quando há necessidade de remover sólidos de menores dimensões, pode-se incluir grades classificadas como ultrafinas (Tabela 2.2).
- Dimensões das barras: devem ser adequados ao tipo de esgoto a ser tratado. De acordo com o espessamento, as barras deverão ser suficientemente robustas para suportar os impactos e esforços impostos pelos procedimentos operacionais.
- Inclinação das barras: pode ser instalada verticalmente ou inclinada ao longo da largura de escoamento. Geralmente as que apresentam dispositivos de remoção de resíduos manuais são inclinadas para facilitar a operação de limpeza. A inclinação varia entre 30° a 45° com a horizontal para grades grosseiras e de 45° a 60° para grades médias e finas. Inclinações menores que 30° geram grandes extensões do canal da grade e inclinações maiores que 60° são utilizadas para grades de limpeza mecanizada contínua, pois o material retido pode se desprender da grade e voltar ao canal afluente nos intervalos de limpeza.

- Forma das barras: geralmente são barras retas, principalmente se o espaçamento entre as barras for pequeno, mas existem as grades de barras curvas com limpeza mecanizada através de ancinho giratório. As barras também podem ter diferentes seções: retangular ou com arestas arredondadas, circulares. Esse fator influência diretamente na perda de carga do sistema.
- Dispositivo de remoção: a remoção pode ser mecânica ou manual e tem como finalidade evitar represamento do esgoto no canal a montante, e consequentemente elevação do nível e aumento excessivo da velocidade do líquido entre as barras, provocando o arraste do material que se pretende remover. Os dispositivos manuais são usados para estações de pequeno porte ou em estações de grande porte, com espaçamento grande entre barras, para a proteção do sistema mecanizado de limpeza a jusante, e consistem na limpeza das grades com a utilização de um ancinho ou garfo. Já os sistemas mecanizados são utilizados em estações de médio e grande porte ou em sistemas com espaçamento pequeno entre as barras, que exigem limpeza contínua.

Tabela 2.2 – Espaçamento entre barras da unidade de remoção de sólidos grosseiros

Tipo de grade	Polegadas	Milímetros
Grades grosseiras	Acima de 1 1/2	40 a 100
Grades médias	3/4 a 1 1/2	20 a 40
Grades finas	3/8 a 3/4	10 a 20
Grades ultrafinas	1/4 a 3/4	3 a 10

Fonte: Jordão e Pessôa (2005).

Como complementação na remoção dos sólidos grosseiros, geralmente utilizam-se peneiras com pequenos espaçamentos para remover os resíduos mais finos. Essas dispõem de aberturas de 0,25 a 6 mm e são classificadas em estáticas ou móveis, em função do tipo de remoção do material retido.

As peneiras estáticas (Figura 2.6) são modelos projetados para promover a autolimpeza. A retenção do material retido se dá através do efeito do fluxo durante o processo de peneiramento. Estas não requerem energia e não possuem peças moveis, apresentando baixo custo de operação e manutenção, no entanto, requerem maior área. As peneiras rotativas (Figuras 2.7 e 2.8) são constituídas de cilindros giratórios, formados pelas barras de aço inoxidável, através dos quais passa o esgoto, retendo-se assim o material que se pretende remover.

Figura 2.6 – Fotografia de uma peneira estática.

Fonte: <http://www.vironquip.com.br/peneira-estatica.htm>.

Figura 2.7 – Fotografia de uma peneira rotativa horizontal – ETE Valinhos- SP

Figura 2.8– Fotografia de uma peneira rotativa em canal – ETE Limeira- SP

Existem no mercado diferentes tipos de equipamentos para a remoção de sólidos grosseiros, dentre eles pode-se destacar as grades de barras de secção retangular com limpeza manual (Figura 2.9 a) e as grades de limpeza mecanizada do tipo escada (Figura 2.9 b), do tipo cremalheira (Figura 2.9 c), do tipo corrente transportadora (Figura 2.9 d).

Figura 2.9 – Fotografia de diferentes tipos de equipamentos para a remoção de sólidos grosseiros: (a) grade retangular com limpeza manual – ETE Limeira- SP; (b). grade do tipo escada – ETE Monjolinho-SP; (c) grade do tipo cremalheira – ETE ABC- Região Metropolitana de São Paulo; (d) grade do tipo corrente transportadora – ETE Conduto Rio Claro- SP.

2.3.2. Desarenadores

Os desarenadores são unidades que priorizam a remoção de detritos constituídos por sólidos abrasivos e não putrescíveis através da sedimentação dos mesmos. Os desarenadores devem ser capazes de remover partículas densas ($\rho_s = 2400 \text{ kg.m}^{-3}$ a 2600 kg.m^{-3}) maiores que 0,15 mm ou, pelo menos, aquelas com tamanho superior a 0,20 mm (WEF, 1998).

A finalidade da remoção desse material no tratamento de esgoto é a de minimizar efeitos adversos ao funcionamento das partes componentes das instalações a jusante bem como os impactos nos corpos receptores, principalmente devidos ao assoreamento.

As finalidades da remoção de areia em estações de tratamento de esgoto são:

- Evitar abrasão nos equipamentos e tubulações;
- Reduzir a possibilidade de obstrução em tubulações, tanques, sifões, orifícios, calhas;
- Reduzir acúmulo de areia no fundo de reatores, de modo geral;

- Reduzir a acumulação de material inerte na manta de lodo dos reatores anaeróbios e, conseqüentemente, no processo de tratamento da fase sólida (presença de areia causa desgaste nos equipamentos de desaguamento do lodo);
- Facilitar o transporte líquido, principalmente à transferência de lodo, em suas diversas fases.

A unidade de remoção de areia, conhecida como caixa de areia ou desarenador, é constituída de dispositivos de retenção e remoção. Os dispositivos de retenção condicionam o escoamento do esgoto a velocidades que permitam separar o material denso que deseja remover, o qual deve ser armazenado em compartimento apropriado para posterior remoção. A velocidade do escoamento horizontal de escoamento é usualmente em torno de $0,30 \text{ m.s}^{-1}$. Acima desse valor, acarreta o arraste de partículas menores do que se deseja remover. Velocidade em torno de $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ causará, também, a sedimentação da matéria orgânica, provocando odores desagradáveis devido a sua decomposição (JORDÃO e PESSÔA, 2005).

A areia retida deve ser frequentemente removida e adequadamente armazenada, e a remoção desta pode ser manual ou mecanizada. A remoção manual exige a paralisação da unidade de retenção, de modo que, com a drenagem do líquido retido na câmara, a areia pode ser facilmente removida. Na remoção mecânica não acontece esse inconveniente da paralisação da unidade, pois esta conta com dispositivos transportadores de areia, que removem continuamente a mesma, acumulada em depósitos, especificamente projetados.

Segundo Jordão e Pessôa (2005) as unidades desarenadoras podem ser classificadas em função das seguintes características:

- De acordo com a forma: prismática (seção retangular ou quadrada), cilíndrica (seção circular);
- De acordo com a separação de fases sólido-líquido: por gravidade (natural e aerada), por centrifugação (vórtex e centrífuga);
- De acordo com a remoção: manual (ciclone separador) e mecanizada (raspador, bombas centrífugas, *air lift*, roscas transportadoras) e;
- De acordo com o fundo: plano (prismática com poço), inclinado (prismática aerada), e cônico (vórtex).

As unidades desarenadoras mais utilizadas são: seção retangular e quadrada com escoamento horizontal, aeradas e de remoção por vórtice ou separadores vorticosos.

Os desarenadores retangulares de escoamento horizontal com limpeza manual são os mais antigos removedores de areia utilizados. Este tipo de unidade deve ser projetado de tal

forma que a velocidade longitudinal seja mantida praticamente constante e o mais próxima de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$. Usualmente, são empregados em ETEs de pequeno a médio porte e em algumas elevatórias de esgoto, com medição de vazão e controle de velocidade através de calha tipo Parshall.

Os desarenadores quadrados de escoamento horizontal são sedimentadores de nível constante, operados com tempos de detenção hidráulica inferiores a 1 minuto. Como essas unidades são desprovidas de dispositivos de controle de velocidade de escoamento, parte da matéria orgânica sedimenta durante os períodos de vazões baixas. Portanto, para adequado funcionamento dessas unidades, é necessária a utilização de equipamentos para lavagem e posterior classificação da areia (WEF, 1998). A remoção de areia é mecanizada e realizada mediante raspagem de fundo com braços duplos de movimento circular até depósito lateral.

As unidades aeradas são caracterizadas pela introdução de ar difuso ao longo de uma de suas paredes laterais, próximo ao fundo da unidade, com a finalidade de promover o fluxo helicoidal, de forma espiral, perpendicular ao eixo longitudinal de escoamento do esgoto na câmara de sedimentação. As partículas com velocidade de sedimentação maior sedimentam na câmara de acumulação de areia, enquanto a matéria orgânica é mantida em suspensão. A quantidade de ar utilizada deve ser devidamente ajustada para que não haja carreamento dos grãos de areia, nem remoção da matéria orgânica particulada (METCALF & EDDY, 2003).

Além da remoção da areia, as caixas aeradas podem promover separação dos óleos, graxas e gorduras, presentes no esgoto, da massa líquida. Tal processo ocorre mediante aderência às bolhas de ar introduzidas pelo sistema de aeração, sendo levadas à superfície e formando uma camada de material flutuante, o qual é removido pelo raspador de espuma da ponte rolante e encaminhado à calha de coleta.

Os desarenadores de remoção por vórtice ou separadores vorticosos são unidades cilíndricas, nas quais o esgoto é introduzido tangencialmente, criando um padrão de escoamento helicoidal na direção do fundo da unidade. A separação sólido-líquido ocorre pela ação combinada de dois campos de aceleração: o gravitacional e o centrífugo (PRADO, 2006).

2.4. Aproveitamento dos resíduos removidos no tratamento preliminar de ETEs

Mesmo com o alto nível de tecnologia envolvido nos processos e operações que compõem as estações de tratamento de esgoto (ETE), a questão da destinação final dos resíduos sólidos removidos no tratamento preliminar de ETE ainda carece de estudos, tanto

em pesquisas quanto em projetos de novas estações; visando, principalmente, a utilização dos subprodutos passíveis de aproveitamento.

Os resíduos removidos no tratamento preliminar de ETEs são: os retidos nos gradeamentos, material sedimentável (areia) e material flutuante (gordura). No Brasil, a prática comum no que se refere ao descarte desses resíduos é de dispô-los no próprio terreno da estação (enterramento ou empilhamento) ou encaminhá-los para aterros; de forma geral, não há preocupação relacionada às potencialidades associadas ao seu aproveitamento direto, redução ou recuperação do volume gerado e impactos ambientais. A disposição em aterros brasileiros, além de representar custo da ordem de R\$ 160 t⁻¹ (referência: ETE Monjolinho, valor em maio de 2014, contabilizados gastos inerentes ao transporte e disposição), ocupa volume que poderia ser efetivamente destinado aos resíduos domésticos.

Apesar de não receber a devida importância, atualmente, esses resíduos passaram a ser considerados um dos problemas no gerenciamento de estações no que se refere ao manuseio, tratamento e destinação final. Dessa forma, a presente pesquisa buscou novas formas de destinações para os resíduos: i) removidos nos gradeamentos grosseiro e fino, visando seu uso como combustível; ii) o material sedimentável retido nos desarenadores, com intuito de utilizá-lo como agregado em concreto; e, iii) os óleos e graxas removidos, visando seu provável aproveitamento como insumo para produção de biocombustível. Também, avaliou a potencialidade de geração de biogás a partir da decomposição de óleos e graxas, mediante degradação anaeróbia.

Nesse contexto, a pesquisa visa o avanço no conhecimento e na avaliação da potencialidade de aproveitamento, ambientalmente adequado e com possibilidade de gerar energia, dos resíduos do tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto.

Somado a isso, esse trabalho visa contribuir com os projetos de novas estações, não só na definição de parâmetros, mas na aproximação da tendência em se obter projetos energeticamente autossuficientes, como é o caso de duas estações de tratamento de esgoto na Áustria (STRASS WWTP e WOLFGANGSEE-ISCHL TP), em que o biogás produzido na digestão anaeróbia do lodo no ano de 2011 atendeu toda demanda energética da estação (NOWAK, *et al.*, 2011).

A seguir, encontra-se uma breve descrição da ETE Monjolinho, local onde foi desenvolvida a pesquisa. E nos capítulos posteriores são apresentadas, separadamente, as potencialidades de utilização dos resíduos removidos nos gradeamentos, da areia sedimentável e da gordura flutuante.

2.5. ETE Monjolinho

2.5.1. Descrição geral

A ETE Monjolinho está localizada na cidade de São Carlos – SP (coordenadas 7.560.900N, 198.000E, altitude 735m e temperatura média de 20 °C) e está sendo implantada em duas etapas. Numa 1ª etapa, com alcance até o ano 2015, foram executados dois módulos paralelos de tratamento, que podem atender a vazão média de até 636 L.s⁻¹ e máxima de 1.050 L.s⁻¹. Na 2ª etapa, com alcance até o ano 2031, será construído mais um módulo, que ampliará a capacidade para vazão média de 954 L.s⁻¹; e máxima de 1.575 L.s⁻¹

Os processos e operações de tratamento do esgoto sanitário da fase líquida da ETE deverão ser executados em duas fases. Numa 1ª fase, com o objetivo básico de remoção de 90% da matéria orgânica, 99,99% dos coliformes fecais e produção de efluente tratado com oxigênio dissolvido de 7 mgO₂.L⁻¹ (mediante pós-aeração). Foi implantado tratamento preliminar, seguido por reatores UASB, floculação, flotação por ar dissolvido, desinfecção com radiação ultravioleta e pós-aeração. O lodo é desaguado por centrífugas. Nessa ETE há, também, um sistema para tratamento complementar de parte do efluente final, visando seu emprego como “água de serviço”.

Com relação à remoção de nutrientes, durante a 1ª fase da 1ª etapa, prevê-se que a coagulação/flotação promova a retenção parcial do fósforo. Na 2ª fase (futura), a ETE poderá, também, remover nitrogênio, mediante implantação de tanques de aeração (TA) entre os reatores UASBs e os flotadores.

Na Figura 2.10 é apresentado o fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto Monjolinho São Carlos-SP, e na Figura 2.11 encontra-se ilustrado a tratamento preliminar da referida estação.

Figura 2.10 – Fluxograma da ETE Monjolinho São Carlos-SP, para a 2ª fase

Fonte: SEREC (2010).

Figura 2.11 – Unidades e equipamento componentes do tratamento preliminar da ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.

2.5.2. Tratamento Preliminar

O sistema de tratamento preliminar é constituído por gradeamentos grosseiro e fino, calha Parshall, caixa de areia aerada (adaptada para também remover “óleos e graxas”), sistema de degradação de gorduras e controle de odores. O sistema implantado tem capacidade para atender vazão média de 636 L.s^{-1} e vazão máxima de 1.050 L.s^{-1} .

O gradeamento grosseiro é composto por duas grades mecanizadas dispostas paralelamente, sendo uma reserva, do tipo de cremalheiras e com espaçamento entre barra de 2 cm (Figura 2.12). As grades descarregam o material retido em uma correia transportadora, com descarga dirigida para uma caçamba com tampas (para evitar o acúmulo de água de chuvas e a proliferação de moscas e geração de odores). Os resíduos retidos no gradeamento grosseiro são encaminhados para o aterro sanitário.

O gradeamento fino é composto por duas grades mecanizadas do tipo escada, instaladas em paralelo, sendo uma reserva, com espaçamento livre entre lâminas de 3 mm (Figura 2.13). Os resíduos retidos nessas são enviados para caçamba, por meio de correia transportadora, e os resíduos retidos, também são encaminhados para o aterro sanitário.

A medição da vazão de esgoto bruto é feita mediante calha Parshall de fibra de vidro, com garganta de 0,915 m ($W = 3'$). No ressalto hidráulico da calha é feita a dosagem de hidróxido de sódio, visando o fornecimento adicional da alcalinidade nos reatores anaeróbios e ajustes do pH para valores próximos à 7,0.

Figura 2.12 – Gradeamento grosso da ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.

Figura 2.13 - Gradeamento fino da ETE Monjolinho SAAE Carlos-SP.

O sistema de remoção de areia e gordura é composto por duas *caixas* aeradas do tipo canal, com 18,00 m de comprimento, 4,00 m de largura e 3,45 m de altura líquida total. As duas caixas possuem removedor mecanizado do tipo ponte rolante de movimento longitudinal. A areia que sedimenta nas *caixas* é removida por duas bombas submersíveis interligadas à ponte, junto ao fundo, e é encaminhada para dois equipamentos “classificadores” de areia (sendo um de reserva), e a seguir para caçamba. A gordura acumulada na superfície dos tanques é arrastada pela ponte para um canal de coleta junto a saída dos mesmos e a seguir é conduzida para um reator de degradação aeróbia. A aeração de cada caixa é provida por 3 aeradores submersíveis, com vazão total de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ cada. Na Figura 2.14 apresentam-se os principais equipamentos para remoção da areia e gordura dos desarenadores, ao passo que na Figura 2.15 está ilustrada uma unidade em operação.

O sistema de degradação de gordura é uma tecnologia inovadora anexada ao tratamento preliminar, no qual foi prevista a remoção mecanizada. A unidade para degradação possui 7,00 m de comprimento e 3,20 m de altura útil, equipada com um aerador mecânico submersível com potência de 75 CV. O efluente tratado é encaminhado, por gravidade, para a caixa divisora de vazão dos reatores UASB. Destaca-se o fato que esse reator também pode ser operado mediante o processo anaeróbio.

O gás produzido no processo é encaminhado para em sistema de tratamento de gases, constituído por leito granular “enterrado”. Na Figura 2.16 são apresentados o sistema de tratamento de gases e o reator de degradação de gordura.

Figura 2.14 – Equipamentos responsáveis pela remoção da areia e gordura dos desarenadores. ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.

Figura 2.15 – Desarenador em operação da ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.

Figura 2.16 – Reator de degradação de gordura Tratamento de gases gerados no tanque de degradação de gordura. ETE Monjolinho São Carlos-SP. ETE Monjolinho São Carlos-SP.

2.5.3. Unidade experimental – Estufa do tipo agrícola construída especialmente para a presente pesquisa

A unidade experimental foi projetada e implantada na ETE Monjolinho e visa à secagem dos resíduos removidos nos gradeamento e nos desarenadores. A estufa do tipo agrícola apresenta as seguintes características: 6,0 m de comprimento, 4,0 m de largura e 3,0 m de altura, e lona plástica em todo o seu entorno.

Para a secagem dos resíduos (removidos nas grades e areia) foi prevista uma baia para cada tipo de resíduo, com 1,2 m de comprimento e 0,6 m de largura e sistema coletor de líquido drenado, composto por dreno e recipiente para coleta do líquido. Para a classificação dos componentes dos resíduos também foram previstas quatro baias, duas com 0,6 m de comprimento e 0,6 m de largura, e duas com 0,5 m de comprimento e 0,6 m de largura. Em todas foi previsto o sistema coletor de líquido drenado, que conduz o líquido para o sistema de esgoto da ETE, retornando para o tratamento preliminar. Na Figura 2.17 encontram-se ilustrações da construção da unidade experimental.

Os gases exalados na estufa são retirados por exaustor de parede do tipo axial, de capacidade de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e pressão de serviço de 6 mmca.

Também, foi previsto espaço para pesagem (balança de até 50 kg) e trituração dos resíduos (triturador forrageiro). Além de tomadas de água potável para limpeza geral da instalação e higiene pessoal do operador.

No desenho, em Anexo 1 está apresentado o croqui da estufa, em planta e corte.

Figura 2.17 – Unidade experimental para presente pesquisa, instalada na ETE Monjolinho SAAE São Carlos-SP.

3. APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS REMOVIDOS NO GRADEAMENTO

3.1. Levantamento Bibliográfico

3.1.1. Generalidades

Neste capítulo discorre-se sobre os resíduos removidos no gradeamento de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), enfatizando a importância de seu aproveitamento energético. Dessa forma, são apresentados alguns conceitos sobre a caracterização desses resíduos, suas alternativas de tratamento, de aproveitamento e de disposição.

Também são descritos os procedimentos experimentais desta pesquisa e seus resultados e conclusões.

3.1.2. Caracterização dos resíduos removidos no gradeamento

Segundo a Water Environment Federation (1998), a quantidade e a composição do material retido no gradeamento grosseiro dependem, principalmente, do espaçamento entre as barras, sendo pouco afetados pelas características das atividades e ocupação da bacia de esgotamento. Para as grades finas, entretanto, as características da área de contribuição da ETE influenciam no volume e qualidade do material removido e sua composição, destacando os principais parâmetros de influência (WATER ENVIRONMENT FEDERATION, 1994; WATER ENVIRONMENT FEDERATION 1998):

- Tamanho da área e tipo de ocupação da bacia de contribuição;
- Configuração do sistema de coleta de esgoto, pois em sistemas que apresentam longo percurso, a degradação que ocorre nas tubulações tende a diminuir a quantidade de material retido no gradeamento;
- A presença de elevatórias diminui a quantidade de material retido no gradeamento da ETE, pois parte dos sólidos é removida antes do bombeamento e a parcela que é bombeada junto com o esgoto tende a ter tamanhos reduzidos, devido à alta turbulência provocada pelas bombas;
- Nível sociocultural e educação sanitária da população atendida.

A literatura técnica correlaciona o espaçamento das barras à quantidade provável de material retido (Tabelas 3.1 e 3.2). Na Tabela 3.2, além dos dados relacionados à quantificação, também são apresentados os teores de umidade e pesos específicos, em função do espaçamento das barras.

Tabela 3.1 – Quantidade de sólidos grosseiros removidos em função do espaçamento das barras

Espaçamento (mm)	Quantidade típica de sólidos grosseiros retidos L (1.000 m³) ⁻¹
12,5	50
20	38
25	23
35	12
40	9
50	6

Fonte: Jordão e Pessoa (2005).

Tabela 3.2 – Dados médios das características e quantidades de sólidos grosseiros removidos do esgoto por meio de gradeamento

Espaçamento (mm)	Teor de umidade (%)	Peso específico (Kg.m³)	Quantidade típica de sólidos grosseiros retidos L (1.000 m³) ⁻¹	
			Faixa	Média
12,5	60 - 90	700 - 1000	37 - 74	50
25	50 - 80	600 - 1000	15 - 37	22
37,5	50 - 80	600 - 1000	7 - 15	11
50	50 - 80	600 - 1000	4 - 11	6

Fonte: Metcalf & Eddy (2003).

Como exemplo, apresentam-se as taxas médias de geração de resíduos nos gradeamentos de duas estações de tratamento de esgoto no município de Maringá- PR: ETE 01 Norte e ETE 02 Sul (Tabela 3.3). Na ETE 01 Norte a unidade de gradeamento é formada por grades com espaçamento entre barras de 20 mm e limpeza mecanizada. Já a ETE 02 Sul possui gradeamento grosseiro (com espaçamento entre barras de 30 mm e limpeza manual com ancinho) e gradeamento médio mecanizado por meio de unidade com corrente transportadora com dentes plásticos, com 15 mm de espaçamento entre dentes.

Tabela 3.3 – Caracterização quantitativa dos resíduos removidos nos desrenadores de duas ETEs em Maringá-PR

Local	Espaçamento entre barras (mm)	Taxa L (1.000 m³) ⁻¹		m³ d ⁻¹
		Faixa	Média	
ETE 01 Norte	20	8,26 – 17,70	12,26	0,14
ETE 02 Sul	15	5,41 – 10,66	8,5	0,09

Fonte: Tomiello (2008).

Ainda, a título de ilustração, citam-se neste texto alguns dados fornecidos pelo Setor de Operação de Esgoto da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S.A. –

SANASA de Campinas - SP, referentes ao gradeamento grosseiro (espaçamento entre barras de 70 cm) da ETE Piçarrão (porte médio), anos de 2007 e 2008, revelando a remoção média mensal de cerca de 4,17 m³ de resíduos, para vazão média do esgoto de aproximadamente 330 L.s⁻¹, o que correspondente a aproximadamente 5,0 L(1.000 m³)⁻¹.

Com base nesses dados e ponderações (e outros disponíveis na literatura técnica) fica evidente o fato de que cada bacia de esgotamento e cada ETE devem ser entendidas como casos distintos.

3.1.3. Composição dos resíduos do gradeamento

Os principais constituintes dos resíduos removidos nos gradeamentos de estações de tratamento de esgoto são: trapos, papel, plásticos, folhas, madeiras, restos de alimentos, dentre outros. Ressalta-se que a composição dos resíduos depende das atividades ligadas à rede coletora de esgoto. Como exemplo, tem-se grande presença de pedras e animais mortos devido às ligações clandestinas de águas pluviais.

Segundo Environmental Protection Agency (1995), os constituintes dos resíduos removidos nas grades grossas, espaçamento da ordem de 75 mm a 100 mm, são geralmente pedras, galhos e grandes pedaços de madeira com pouca matéria orgânica putrescível. No caso das grades médias (espaçamento de 20 mm) e finas (espaçamento inferior a 6 mm), os resíduos apresentam elevado teor de sólidos voláteis. Geralmente, nas grades finas se encontram quantidades significativas de gordura e espuma.

Water Environment Federation (1998) citam algumas características dos materiais retidos nas unidades de gradeamento grosseiro e fino, as quais estão apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características do material retido nos gradeamentos grosseiro e fino. Valores médios e valores obtidos de grades com aberturas 0,8 mm a 3,0 mm

Parâmetros	Gradeamento grosseiro	Gradeamento fino	
	Valores médios	Valores médios	Grade fina (0,8 mm a 3,0 mm)
Sólidos secos (%)	10 a 20	10 a 20	8 a 23
Sólidos voláteis (%)	70 a 95	80 a 90	68 a 94
Densidade aparente (kg.m ⁻³)	640 a 1.100	640 a 960	850 a 1.070
Valor combustível (kJ.Kg ⁻¹)	12.600	7.820	—

Fonte: Water Environment Federation (1998).

Le Hyaric *et al.* (2009) analisaram e quantificaram os resíduos retidos em grades com espaçamento entre barras variando de 3 a 60 mm, de três estações de tratamento de esgoto localizadas na região de Rhône-Alpes, França. Foram coletadas 30 amostras em cada ETE, em diferentes épocas do ano, para avaliar a influência de diversos fatores sobre a composição dos resíduos. Para tanto, as amostras coletadas foram secadas por uma semana, a 80° C, com posterior análise de sua composição. Os resultados mostraram que a retenção média variou entre 0,53 e 3,49 kg (massa úmida) per capita por ano. As maiores taxas de produção foram observadas durante, ou imediatamente após, as condições de tempo chuvoso. O teor de matéria seca variou entre 14,4% e 29,2% da massa úmida, enquanto o teor de matéria volátil permaneceu entre 70,0% e 90,5% de massa seca. Nos materiais retidos, verificou-se a predominância de resíduos de higiene pessoal, com porcentagem variando de 65,2% a 73,6% do total da massa seca e de resíduos finos, com dimensões menores que 20 mm, com porcentagem variando de 15,2% a 18,2% do total da massa seca.

Na Tabela 3.5 apresenta-se a proporção, em relação ao peso total, dos principais resíduos retidos nas grades, conforme dados do Departamento de Água e Esgoto do Estado de São Paulo (1969).

Tabela 3.5 – Composição dos resíduos retidos no gradeamento

Material	Proporção do peso total
Papéis	10 a 70 %
Estopa	10 a 20 %
Trapos e panos	5 a 15 %
Materiais diversos	20 a 60 %
Material volátil	85%

Fonte: DAE – Departamento de Água e Esgoto do Estado de São Paulo (1969) *apud* LINS (2010).

3.1.4. Tratamento e disposição dos resíduos do gradeamento

Os resíduos removidos nas unidades de gradeamento podem passar por alguns processos antes de sua disposição final, visando reduzir o volume, minimizar exalação de odores e proliferação de insetos ou apenas facilitar seu manuseio. Tais processos/operações são apresentados a seguir (TOMIELLO, 2008):

- Lavagem: visa à retirada do material putrescível aderido à superfície dos resíduos; pode ser realizada mediante utilização de dispositivos mecânicos ou manualmente, com auxílio de jatos de água. O efluente da lavagem retorna para o processo de tratamento;

- Secagem (desaguamento): a água livre presente nos resíduos pode ser retirada mediante soluções simples, como disposição em canaletas perfuradas em estações de pequeno porte ou através de dispositivos mecânicos (prensa, parafuso-sem-fim, transportadora) em estações maiores. A finalidade de tal operação é a redução do volume (que pode chegar a 75%) e dos inconvenientes da armazenagem e transporte do material úmido;
- Controle de odor e de proliferação de insetos: é prática usual aspergir camada de cal hidratada sobre os resíduos estocados, de aproximadamente 0,50 a 1,00 kg.m⁻² diariamente ou conforme seja necessário. Também podem ser utilizados sistemas de cobertura dos tambores ou caçambas com lonas ou tampas móveis, com o benefício de se proteger o material da umidade proveniente da chuva visto que, geralmente, essas instalações geralmente estão ao ar livre.

As possibilidades de aproveitamento dos resíduos em estado bruto são praticamente inexistentes, devido, principalmente, aos seguintes fatores:

- Presença de matéria putrescível;
- Grande heterogeneidade e sazonalidade na sua composição e geração;
- Grande teor de umidade;
- Densidades elevadas de micro-organismos patogênicos.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 375/06 (Brasil, 2006), não é permitida a utilização agrícola dos resíduos de gradeamento.

A disposição dos resíduos do gradeamento deve ser cuidadosamente monitorada, pois a mesma apresenta potencial ofensivo para a saúde humana e para o meio ambiente devido às suas características. No Brasil, usualmente, a prática comum é encaminhar os resíduos do gradeamento para aterros sanitários e lixões, ou então, dispô-los no próprio terreno da estação (enterramento ou empilhamento).

Nos Estados Unidos, em algumas grandes estações de tratamento de esgoto, os resíduos do gradeamento são incinerados conjuntamente com outros sólidos, como o lodo gerado nos processos biológicos e areia removida nos desarenadores. Os gases produzidos na incineração podem ser aproveitados na própria estação, mas essa alternativa deve ser cuidadosamente analisada, pois gera uma série de outros resíduos sólidos, como as cinzas, e líquidos oriundos dos sistemas de tratamento de gases que também devem ter disposição final ambientalmente adequada (JORDÃO e PESSOA, 2005).

A escassez de energia elétrica e a falta de áreas adequadas para a disposição final dos resíduos constituem dois graves problemas com que se defronta o Brasil na atualidade. Portanto, a produção de energia elétrica a partir de resíduos removidos no gradeamento de ETEs surge como opção no gerenciamento desse tipo de resíduo, atendendo aos objetivos previstos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que é o incentivo ao desenvolvimento de sistema de gestão ambiental e empresarial voltadas para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético. Porém, essa solução somente é viável economicamente, para ETEs de grande porte.

3.1.5. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos

3.1.5.1. Considerações Iniciais

Neste item é realizada abordagem geral sobre aproveitamento energético de resíduos. Como a literatura técnica pertinente aos resíduos de gradeamento é bastante escassa, procurou-se neste texto proporcionar ao leitor referências mínimas ao entendimento do tema, de modo a situá-lo nos conceitos do processo.

3.1.5.2. Panorama energético brasileiro

De acordo com Balanço Energético Nacional (2014), ano base 2013, a oferta interna de energia (total de energia demandada no país) atingiu 296,2 Mtep, registrando taxa de crescimento de 4,5% ante a evolução do PIB nacional de 2,3%, segundo o último dado divulgado.

A viabilização da expansão necessária ao adequado atendimento da demanda, com baixo custo da energia, implementando programas de conservação e de eficiência e segurança energética, e considerando as questões socioambientais, dentro do conceito do desenvolvimento sustentável, é o maior desafio a ser enfrentado pelo setor energético nacional, nos próximos anos (LOBÃO, 2008).

Aspectos econômicos continuam a exercer forte influência na definição da matriz energética, porém não possui mais exclusividade nas decisões voltadas a estabelecer o padrão de utilização. O fator econômico pode atuar como um incentivo, contrapondo a visão de ser uma barreira, para o desenvolvimento de novas fontes de energia e de tecnologias, ampliando assim as possibilidades de recursos a serem utilizados (MACHADO JÚNIOR *et al.*, 2009).

Segundo dados disponibilização pelo Balanço Energético Nacional, em 2013, a participação de renováveis na matriz energética brasileira representou 41,0%, ao passo que no mundo essa participação foi de apenas 13,0%. Na Tabela 3.6 encontram-se a oferta interna de energia de 2004 até 2013 para o Brasil, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2014).

Tabela 3.6 – Oferta interna de energia no Brasil de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2014

Fonte	(%)									
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Não renovável	56,0	55,3	54,8	53,9	53,9	52,7	54,9	56,0	57,7	59,0
Petróleo	39,3	38,8	37,9	37,5	36,7	37,9	37,8	38,6	39,3	39,3
Gás natural	8,9	9,4	9,6	9,3	10,3	8,8	10,2	10,2	11,5	12,8
Carvão mineral e Coque	6,3	6,0	5,7	5,7	5,5	4,6	5,4	5,7	5,4	5,6
Urânio (U ₃ O ₈)	1,5	1,2	1,6	1,4	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5	1,3
Renovável	44,0	44,7	45,2	46,1	46,1	47,3	45,1	44,0	42,3	41,0
Energia Hidráulica	14,5	14,9	14,9	14,9	14,1	15,2	14,0	14,7	13,8	12,5
Lenha e Carvão vegetal	13,2	13,1	12,7	12,0	11,6	10,1	9,7	9,5	9,1	8,3
Produtos da cana de açúcar	13,5	13,8	14,6	15,9	17,0	18,1	17,5	15,7	15,4	16,1
Outras renováveis	2,8	2,9	3,0	3,2	3,4	3,9	3,9	4,1	4,0	4,2
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: MME (2014).

No que se refere ao setor de eletricidade, o Brasil dispõe de uma matriz de origem predominantemente renovável (79,3%), com destaque para a geração hidráulica que responde por 70,6%, conforme pode ser visualizado na Figura 3.1. Ressalta-se que, em 2013, houve redução de 6,15% na fonte renovável em relação ao ano de 2012, devido às condições hidrológicas desfavoráveis e ao aumento da geração térmica (MME, 2014).

Figura 3.1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte- Ano 2013. Fonte: MME (2014).

Notas: ¹ Inclui gás de coqueria; ² Inclui importação de eletricidade; ³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações.

As grandes usinas hidrelétricas são as principais geradoras de eletricidade no Brasil. A maior parte de nossa matriz está concentrada nessa fonte e os planos de expansão da geração de energia também privilegiam a construção de grandes usinas. Apesar de serem conhecidas como fonte de energia limpa com baixos níveis de emissão de gases de efeito estufa, as usinas hidrelétricas de grande porte, causam grandes impactos ambientais e sociais. Outras fontes renováveis de menos impacto ambiental podem e devem ter papel mais relevante na matriz energética brasileira (WWF – Brasil, 2012).

No Brasil o marco importante para o fomento às fontes renováveis alternativas foi o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) criado em 2002, cujo objetivo é buscar soluções de cunho regional para o uso de fontes renováveis de energia e incentivo ao crescimento da indústria nacional.

O programa prevê a implantação de 144 usinas, com capacidade instalada total de 3,29 milhões de kW. São 63 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), 54 usinas eólicas e 27 usinas de biomassa. A energia produzida com apoio do Proinfa é comprada pela Eletrobrás com contratos de 20 anos e valores pré-fixados, e repassados aos consumidores finais por meio das revisões tarifárias. O Proinfa exige a nacionalização de 60% dos custos de construção dos projetos e possibilita maior inserção de pequenos produtores de energia, o que contribui para a diversificação dos agentes do setor.

O potencial técnico de geração das fontes alternativas é grande no Brasil, entretanto, seu potencial econômico ainda não é atrativo, mas pode ser melhorado por meio de políticas e ações governamentais que visem à ampliação da competitividade dessas fontes por meio da redução dos custos de geração e da mitigação de barreiras de mercado.

3.1.5.3. Tecnologias para Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos

Existem diversas tecnologias disponíveis, aplicadas ou em desenvolvimento para o processamento térmico de alguns resíduos sólidos como: incineração, co-combustão, pirólise, gaseificação, processamento biológico, dentre outras.

A pirólise consiste em uma série de reações químicas complexas na ausência de oxigênio com temperaturas variando entre 300 e 900 °C, que levam à decomposição e quebra da matéria orgânica, e a separação de diferentes componentes em gases individuais. Os produtos da pirólise são gases, carvão e alcatrão (WERTHER e OGADA, 1999).

A gaseificação é um processo de decomposição térmica da matéria sólida em gás combustível, na presença de uma fonte de calor e de uma quantidade de oxigênio abaixo do mínimo necessário para realização da combustão. O produto da gaseificação é um insumo energético limpo e flexível no seu uso e manuseio (KRAUSE, 1990).

O processo de incineração consiste geralmente em dois estágios. Inicialmente, resíduo é queimado na câmara primária em temperatura que varia, tipicamente, entre 500°C e 900°C para que algumas substâncias presentes se tornem gases e outras assumam forma de pequenas partículas. A alimentação de oxigênio nessa câmara é subestequiométrica, evitando-se assim gradientes elevados de temperatura. Em condições controladas, é evitada volatilização de grandes quantidades de metais presentes no resíduo, como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, entre outros. Além disso, minimiza-se a formação de óxidos nitrosos, que surgem apenas em temperaturas mais elevadas.

A fase gasosa gerada na câmara primária é encaminhada para a câmara secundária, em que a mistura de gases e partículas é queimada a uma temperatura mais alta por intervalo de tempo suficiente para que haja a combustão completa. Nesse estágio, a atmosfera é altamente oxidante (excesso de oxigênio) e a temperatura de projeto varia normalmente entre 750°C e 1250°C. Os gases gerados na primeira câmara são oxidados em CO₂ e H₂O. Nessa temperatura, a probabilidade de existência de moléculas com grande número de átomos como dioxinas e furanos, compostos altamente nocivos aos seres humanos, é praticamente desprezível (IEA, 1997; ARANDA, 2001).

Os produtos gerados nesse processo são: gases, os quais devem passar por tratamento adequado antes de serem enviados para atmosfera, para reduzir a concentração de alguns poluentes gasosos presentes e material particulado; as cinzas, que são em sua maioria formadas por constituintes inorgânicos que estavam presentes nos resíduos; e o calor.

Conforme Renosam (2006), os incineradores reduzem o volume dos resíduos de 95 a 98% do volume original, dependendo da composição e do grau de recuperação de materiais, como metais.

A utilização da incineração para a recuperação energética dos resíduos é uma tecnologia conhecida como *Waste to Energy* (WTE), em que se utiliza a incineração para produzir o vapor que irá gerar energia elétrica ou será usado diretamente em processos industriais (ou para aquecimento). A capacidade de geração depende, diretamente, da eficiência da transformação do calor em energia elétrica e do poder calorífico do material incinerado.

Há muitos trabalhos publicados sobre o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. Como exemplo, tem-se: o capítulo do livro *Fonte Alternativas de Energia* intitulado como *Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos e Óleos Vegetais*, ROSA *et al.*, (2003); a tese de OLIVEIRA (2004) referindo-se ao *Potencial Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil* (2008); e a Nota Técnica do Ministério de Minas e Energia sobre *Aproveitamento Energético dos Resíduos Urbanos de Campo Grande – MS*; dentre outros.

Também, vem sendo pesquisada, por diversos autores, a geração de energia utilizando lodo de estações de tratamento de esgoto como combustível alternativo. Entretanto, há pouca informação sobre resíduos provenientes do gradeamento de ETEs. Por esse fato, ainda tem-se de tomar como referência inicial os resultados para os resíduos sólidos urbanos e lodo biológico de ETE. Por exemplo, estão apresentados na Tabela 3.7 os valores do Poder Calorífico de alguns resíduos sólidos urbanos (RSU) encontrados na literatura técnica especializada, e na Tabela 3.8 apresentam-se as características físico-químicas do lodo de alguns trabalhos que avaliaram seu potencial energético.

Tabela 3.7 – Valores do Poder calorífico superior e inferior dos resíduos sólidos urbanos

Tipo de Resíduos Sólidos	País	Poder calorífico Superior kcal kg ⁻¹		Poder calorífico Inferior kcal.kg ⁻¹		Método/Norma	Autor
		Média	Faixa	Média	Faixa		
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	Brasil	3.690,60	2.308-5.438	3.536,80	2.154-5.284	ASTM D2015	CANSADO, J. C. <i>et al.</i> (2007)
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	Brasil	3.757,67	2.950-4.640	-	-	ASTM D240-87 e DIN CEN/TS 15.400 (2006)	SOARES, E. L.S.F. (2011)
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	Malásia	2.180,00	1.540 - 2.640	-	-	ASTM E 711-87	KATHIRVALEA, S. <i>et al.</i> (2004)
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	Estados Unidos	4.551,50	-	4.142,40	3.201-5.846	ASTM D240	CHANG N., DAVILA E. (2008)
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	Taiwan	2.166,29	1.968-2.255	1702,75	1.541-1.889	Não especificado	KUO, J. H. <i>et al.</i> (2008)
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	Índia	1.687,74	1.557-1.766	1.027,75	899 -1.089	Não especificado	KUMAR, J. S. <i>et al</i> (2010)

Tabela 3.8 – Característica de lodo de estações de tratamento de esgoto

Tipo de Lodo	Teor de umidade (%)	Matéria Volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Teor de cinzas (%)	Poder calorífico base seca (kcal.kg ⁻¹)			Autor
					Superior	Inferior	Método/Norma	
Lodo anaeróbio desaguado ¹ (ETE Uberabinha)	Não analisado	65,00	Não analisado	Não analisado	3.869,30	Não analisado	DIN 51900, ISO 1928, ASTM D240, ASTM D1989, ASTM E711	SILVA, J. O. (2011)
Lodo seco ² (ETE São Bento do Sul)	9,05	43,30	Não analisado	47,50	4.800,80	4.442,53	Não especificado	BORGES, F. et al. (2008)
Lodo Aeróbio seco ³ (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento)	9,11	65,34	8,92	25,74	3.821,44	3.572,52	ASTM D 2015	BORK, J. A. (2011)
Lodo Anaeróbio seco ³ (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento)	6,65	58,57	5,99	35,44	3.488,08	3.269,90	ASTM D 2015	BORK, J. A. (2011)
Lodo digerido seco ³ (Companhia de Saneamento de Minas Gerais)	6,52	39,73	2,17	58,10	2.119,54	2.011,01	ASTM D 2015	BORK, J. A. (2011)
Lodo desaguado (ETE em Hangzhou)	Não analisado	43,79	2,56	53,65	Não analisado	2.589,09	Não especificado	WENYI <i>et al.</i> , (2009)
Lodo digerido desaguado	3,7	40,50	8,30	47,50	2.101,84	2.054,07	DIN 51900-3	POKORNA <i>et al.</i> , (2009)
Lodo desaguado ⁴ (ETE em Pequim)	Não analisado	65,36	Não analisado	27,15	3.609,21	Não analisado	standardized methods for fuel analyses	WANG et al., (2008)
Lodo estabilizado com cal e utilizado Cloreto ferrico como condicionante químico	Não analisado	55,90	3,80	40,30	3.054,84	Não analisado	Não especificado	FOLGUERAS et al., (2003)

Equipamentos utilizados no desaguamento: ¹ centrifuga; ² leito de secagem; ³ secador térmico; ⁴ filtro prensa.

Secou-se o lodo desaguado em estufa a 105°C durante 24 horas.

Ressalta-se que o poder calorífico é de extrema importância na elaboração de projetos para tratamento e geração de energia.

Define-se poder calorífico como a quantidade de energia na forma de calor liberada na oxidação de determinado combustível. Existem duas formas de poder calorífico: o poder calorífico superior (PCS), em que a combustão se efetua a volume constante, no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor derivado dessa condensação é recuperado; e o poder calorífico inferior (PCI), que é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível, após dedução das perdas com a evaporação da água.

Para fins de aproveitamento energético, quanto maior o percentual de resíduos com composição orgânica, como plástico, papel, papelão, borracha, couro, têxteis, resíduos de poda e capina, maior será a capacidade de geração de energia térmica, tendo em vista que esses materiais possuem elevado poder calorífico. Na Tabela 3.9 estão apresentados os valores do poder calorífico em relação à caracterização dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 3.9 – Valor médio do Poder calorífico de alguns componentes dos resíduos sólidos urbanos

Material	Poder calorífico ¹ (kcal.kg ⁻¹)	Poder calorífico inferior ² (kcal.kg ⁻¹)
Resíduo de comida	1.310	700
Papel e papelão	4.030	2.500
Têxtil	3.480	3.400
Madeira	2.520	4.300
Plástico	6.300	5.000
Borracha	6.780	-
Couro	3.630	-

Fonte: ¹Tolmasquim e Guerreiro (2008).

² Conesa (2005).

De acordo com os dados que constam na Tabela 3.9, plástico, borracha e couro são os materiais com maior capacidade de gerar energia devido ao alto poder calorífico. A incineração de plástico e de papel, por exemplo, resulta em cerca de 3,3 MWh.t⁻¹ e 3,5 MWh.t⁻¹ de eletricidade, respectivamente (ROSA *et al.*, 2003).

Embora a classificação segundo o poder calorífico inferior (PCI) não deva ser considerada definitiva para estabelecer a destinação dos resíduos sólidos urbanos, considera-se que (EPE, 2008):

- Para $PCI < 1.675 \text{ kcal.kg}^{-1}$, a incineração não é tecnicamente viável (além de dificuldades técnicas, exige ainda a adição de combustível auxiliar);

- Para $1.675 \text{ kcal.kg}^{-1} < \text{PCI} < 2.000 \text{ kcal.kg}^{-1}$, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico;
- Para $\text{PCI} > 2.000 \text{ kcal.kg}^{-1}$, a queima bruta (*mass burning*) é tecnicamente viável.

O poder calorífico dos resíduos pode variar em função de diversas condições, como a composição do resíduo, sua umidade e o teor de cinzas. Usualmente, maior será o poder calorífico, quanto maior for o teor de material volátil e menores forem os teores de umidade e cinzas dos resíduos (FEAM, 2012). Informações referentes ao poder calorífico inferior, à umidade e ao teor de cinzas das frações dos resíduos sólidos urbanos podem ser consultadas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Poder calorífico inferior, umidade e teor de cinzas das frações de resíduos sólidos urbanos

Resíduos Sólidos Urbanos	PCI (kcal.kg^{-1}) (base úmida sem cinzas)	Umidade (%)	Cinzas (%)	PCI (kcal.kg^{-1}) (base seca)
Matéria Orgânica	712	66	25	4.300
Papael e papelão	2.729	21	5	3.800
Têxteis e couro	1.921	36	10	4.200
Madeira	2.490	25	5	3.700
Plástico	8.193	17	3	10.300
Borracha	8.633	5	6	9.700

PCI*: Poder Calorífico Inferior.

Fonte: CODESC (2003) *apud* FEAM (2012).

Quanto maior o teor de umidade, menor será a quantidade de energia útil para o sistema de geração de energia, pois o calor latente de evaporação é perdido com os gases de combustão, acarretando no aumento do consumo do combustível.

Além disso, o teor de umidade do material combustível, sendo muito variável, pode tornar difícil o processo de combustão, principalmente no que diz respeito ao seu controle, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema de admissão de ar dos equipamentos. Também, poderá causar o aparecimento de material particulado (fumaça escura e densa resultante de material combustível não totalmente queimado) junto aos gases produzidos durante a queima (FEAM, 2012).

Na Universidade Federal do Rio de Janeiro, em decorrência do projeto realizado pela parceria do IVIG/COPPE/UFRJ e a USINAVERDE foi feita análise do poder calorífico dos RSU da instituição e obteve-se o valor de $2,66 \text{ MWh.t}^{-1}$, do material seco. Caso o material fosse incinerado sem a prévia secagem, seu poder calorífico seria de apenas $0,7 \text{ MWh.t}^{-1}$ de

RSU. Este fato denota a relevância da secagem do material, rico em matéria orgânica, antes de ser levado para a incineração.

A tendência mundial é a de aproveitar os resíduos urbanos para a geração de energia, de forma a equacionar os problemas de energia e do tratamento ambientalmente correto do resíduo, para atender as exigências ambientais. Em vários países existem termelétricas movidas a carvão e resíduos sólidos urbanos em fornos contínuos e com os ciclos de vapor integrados na geração de energia elétrica. Na Tabela 3.11 estão apresentadas algumas dessas plantas com suas capacidades de instalação e de geração de energia.

Tabela 3.11 – Plantas de incineração com geração de energia

Localização	Capacidade de tratamento (t.d ⁻¹)	Produção de energia bruta (MW)
Tsurumi, Japão	600	12
Tomida, Nagoya, Japão	450	6
Dickerson, Maryland, USA	1800	63
Alexandria, Virginia, USA	975	22
Isvag, Antuérpia, Bélgica	440	14
Savannah, USA	690	12
Izmit, Turquia	96	4
UIOM Emmenspitz, Suíça	720	10
Wells, Áustria	190	7

Fonte: Menezes *et al.* (2000).

Segundo Menezes *et al.* (2000), pode-se afirmar que 1 tonelada de RSU equivale a 200 kg de carvão ou 250 kg de combustível ou ainda 500 kW.h de energia elétrica. O calor recuperado pela incineração pode representar cerca de 6 a 7 % da energia consumida pela população que gera o RSU. A geração de energia elétrica se torna rentável em instalações com capacidades de processamento acima de 250 toneladas por dia. Abaixo desse valor, a energia é geralmente aproveitada apenas para uso da própria planta.

Segundo Tolmasquim (2003), com a incineração controlada dos resíduos sólidos urbanos (lixo) é possível, com 500 toneladas diárias, abastecer uma usina termelétrica com potência instalada de 16 MW, o que representa potencial energético de cerca 0,7 MW.h t⁻¹.

De acordo com a EPA (2002), a incineração pode produzir até 550 kW.h por tonelada de resíduo, levando em conta que pode haver perdas na transmissão de até 5% do total produzido, tem-se valor de 523 kWh por tonelada.

Uma das poucas referências encontradas sobre o aproveitamento energético dos resíduos removidos no tratamento preliminar de ETEs foi a de Gikas P. *et al.* (2010), que avaliaram a geração de energia mediante utilização do processo de gaseificação UHT dos resíduos removidos na peneira rotativa da ETE de Adelanto – CA – USA, com vazão média de 15.000 m³.d⁻¹. A energia gerada utilizando 5 kg desse tipo de resíduo, com teor de umidade de aproximadamente 15%, foi de 67,81 MJ. A energia elétrica utilizada para funcionamento na etapa de peneiramento foi calculada em de 27 MJ, demonstrando ganho de 2,5 vezes de energia. As características físico-químicas dos resíduos utilizados na pesquisa estão apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Características dos resíduos removidos na peneira rotativa da ETE de Adelanto –CA – USA

Parâmetro	Unidade	Valor
Matéria Volátil	% base seca	86,31
Cinzas	% base seca	5,79
Carbono Fixo	% base seca	7,9
Carbono Total	% base seca	45,8
Hidrogênio	% base seca	6,54
Nitrogênio	% base seca	1,57
Oxigênio	% base seca	40,1
Enxofre	% base seca	0,22
Cloreto	% base seca	0,036
Teor de umidade	%	59,21
Poder Calorífico	kcal.kg ⁻¹	4.299,23

Fonte: Gikas, P. *et al.* (2010).

O processo de geração de energia elétrica decorrente da incineração apresenta os seguintes aspectos positivos: uso direto da energia térmica para a geração de vapor; consumo contínuo de resíduos; redução do volume de rejeitos depositados em aterro sanitário; processo relativamente sem ruídos e pequena área para instalação. Em contrapartida, os aspectos negativos são: inviabilidade com resíduos clorados (emissão de dioxinas e furanos) e de menor poder calorífico; umidade excessiva prejudica a combustão; necessidade de equipamento auxiliar para manter a combustão; possibilidade de concentração de metais nas cinzas e relativos altos custos de investimento, operação e manutenção (HENRIQUES, 2004).

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Resíduos dos gradeamentos grosseiro e fino

A avaliação da potencialidade de aproveitamento dos resíduos retidos nos gradeamentos grosseiro e fino, como combustível, envolveu, inicialmente, a quantificação e a caracterização desses materiais durante a operação rotineira da ETE Monjolinho São Carlos-SP, o monitoramento ocorreu em diferentes épocas do ano, a fim de acompanhar os efeitos da sazonalidade na quantidade de material retido, no poder calorífico, teor de umidade e composição.

Para tanto, foram realizadas nove amostragens para cada gradeamento (grosseiro e fino) ao longo de um dia de operação. As amostras foram coletadas mediante utilização de um dispositivo condutor dos resíduos, de forma a desviar o material que seria lançado na caçamba, conforme ilustrado na Figura 3.2a, em direção ao recipiente de coleta, tal qual observado na Figura 3.2b. Cabe destacar que o dispositivo condutor foi protegido com uma lona plástica, de forma a evitar a interferência da chuva nas amostragens.

Devido à existência de um único dispositivo para coleta, as amostragens para cada gradeamento foram realizadas em dias diferentes e, quando possível, em dias subsequentes.

Figura 3.2 – Ilustração da coleta dos resíduos nos gradeamento grosseiro e fino (a) modo convencional:disposição nas caçambas (b) dispositivo condutor utilizado na pesquisa.

Os resíduos coletados foram quantificados (pesados) e uma amostra, de aproximadamente 1 kg, foi retirada para determinação de sólidos totais e teor de umidade. Posteriormente, parcela do material coletado foi encaminhada para estufa tipo agrícola, local onde ocorreu o processamento e secagem do material, conforme ilustrado no capítulo 2 desta tese (Figura 2.17).

Os resíduos de cada gradeamento eram dispostos em uma baia (1,2 m de comprimento e 0,6 m de largura), para secagem durante quinze dias. Durante o processo de secagem foram aferidas temperaturas interna e externa da estufa.

O líquido percolado, coletado juntamente com os resíduos, foi quantificado e caracterizado. Esse material foi obtido mediante sistema de drenagem, nos momentos seguintes em que os resíduos eram despejados em suas baias. Posteriormente, o percolado foi conduzido para o sistema de esgoto da ETE, retornando para o tratamento preliminar. Na Figura 3.3 estão ilustradas as baias para acondicionamento dos resíduos e o sistema de drenagem do percolado.

Figura 3.3 – Baias para acondicionamento dos resíduos (setas vermelhas) e sistema de drenagem do percolado (setas amarelas)

Após o tempo de secagem, antes de iniciar a caracterização dos resíduos, coletou-se amostra representativa, de aproximadamente 1 kg, para determinação de sólidos totais e umidade. Em seguida, o material seco foi separado e agrupado de acordo com a seguinte tipologia: matéria orgânica putrescível (restos de alimentos, animais em decomposição, fios de cabelo, galhos e folhas); plásticos (garrafas pet, tampinhas, embalagens diversas,

preservativo); papel (absorventes femininos, fraldas); tecidos (panos, trapos), pedra e outros. Foi realizada a pesagem e medição de volume de cada grupo separadamente. Na Figura 3.4 apresentam-se as fotografias de cada componente dos resíduos.

Devido à especificidade para determinação do poder calorífico superior, foi realizado o quarteamento do resíduo seco na unidade experimental, até a obtenção de amostra representativa. Na sequência, a amostra foi encaminhada para estufa a 105°C, durante 24 horas e, posteriormente foi triturada. Para tanto, foram retirados os resíduos de elevada densidade e outros materiais que poderiam danificar o equipamento de trituração.

A determinação do poder calorífico superior e inferior da amostra triturada foi realizada no laboratório da Bioagri Ambiental, segundo a Norma ASTM D 240, em que se baseia na combustão completa do material, com oxigênio puro, a volume constante, e na transferência de calor para certa quantidade de água contida em um calorímetro.

Foi levantada a relação massa de resíduos por m³ de esgoto afluente, para as unidades de gradeamento grosseiro e fino.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 3.4 - Composição dos resíduos removidos nos gradeamentos: (a) plástico; (b) pedra; (c) papel; (d) tecido; (e) matéria orgânica putrecível; (f) outros (espuma, alumínio)

3.2.2. Análise Estatística

Os dados obtidos nas determinações e caracterização dos resíduos do gradeamento foram submetidos à análise estatística básica (estatística descritiva) sendo obtidos valores máximos e mínimos, de tendência central (média, mediana) e valores de dispersão (desvio padrão, variância, quartiz).

3.3. Resultados

Na Tabela 3.13 estão apresentados os dados da quantificação dos resíduos dos gradeamentos grosseiro e fino, bem como da vazão média de esgoto sanitário afluente à estação, para o período compreendido entre novembro de 2010 e maio de 2014. As informações foram disponibilizadas pela gerência da ETE Monjolinho – SAAE São Carlos.

Cabe comentar que não foram disponibilizados os dados da quantidade dos resíduos nos meses dezembro de 2011. Por questões internas da administração da ETE, no período compreendido entre fevereiro de 2012 a fevereiro de 2013, não foi possível quantificar separadamente os resíduos do gradeamento grosseiro e fino, uma vez que os mesmos foram dispostos juntamente na mesma caçamba.

Com intuito de alcançar dados mais significativos da produção de resíduos na ETE, bem como obter quantificação individualizada de cada tipo de gradeamento, eram coletados resíduos durante um dia de operação (24 horas consecutivas). Nas Tabelas 3.14 e 3.15 apresentam-se dados referentes à quantificação dos resíduos removidos no gradeamento grosseiro e fino, respectivamente.

A partir das taxas de geração dos resíduos apresentados na Tabela 3.13 e com os dados médios das densidades (Tabelas 3.14 e 3.15) foi possível estimar a relação entre volumes de resíduos e de esgoto afluente para cada unidade de gradeamento. Os resultados obtidos foram: $4,2 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$ para o gradeamento grosseiro e $3,7 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$ para o gradeamento fino. Ressalta-se esses valores foram inferiores aos encontrados na literatura especializada, em que era “esperado”, de acordo com os dados de Jordão e Pessôa (2005), cerca de $38 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$ e $50 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$ para gradeamento grosseiro e fino, respectivamente.

Tabela 3.13 – Quantificação dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino

Mês/Ano	Vazão média mensal (Ls ⁻¹)	Gradeamento grosseiro		Gradeamento fino	
		kg	kg.(1000m³) ⁻¹	kg	kg.(1000m³) ⁻¹
nov/10	520,0	4.140	3,1	4.170	3,1
dez/10	545,4	5.490	3,9	5.170	3,7
jan/11	460,4	3.160	2,6	-	-
fev/11	443,8	2.490	2,2	2.630	2,3
mar/11	484,0	7.280	5,8	8.040	6,4
abr/11	484,0	3.900	3,1	470	0,4
mai/11	452,0	4.410	3,8	-	-
jun/11	466,0	4.260	3,5	2.950	2,4
jul/11	459,0	2.330	2,0	3.380	2,8
ago/11	483,0	2.880	2,3	4.290	3,4
set/11	480,0	2.700	2,2	2.560	2,1
out/11	473,0	3.660	3,0	2.140	1,7
nov/11	492,0	9.840	7,7	4.920	3,9
jan/12	487,0	2.280	1,8	4.290	3,4
mar/13	650,0	3.000	1,8	4.000	2,4
jun/13	600,0	2.500	1,6	2.500	1,6
jul/13	600,0	2.000	1,3	4.000	2,6
ago/13	600,0	4.500	2,9	4.500	2,9
set/13	670,0	4.000	2,3	4.000	2,3
out/13	670,0	3.500	2,0	3.500	2,0
nov/13	670,0	4.000	2,3	5.000	2,9
dez/13	495,0	5.000	3,9	5.000	3,9
jan/14	482,0	4.000	3,2	4.000	3,2
fev/14	471,0	4.500	3,7	4.500	3,7
mar/14	470,0	800	0,7	3.200	2,6
abr/14	443,0	6.000	5,2	7.000	6,1
mai/14	463,0	2.500	2,1	2.500	2,1
Média	519,0	3.893	3,0	3.948	3,0
Desvio padrão	73,3	1.735	1,4	1.480	1,2

Tabela 3.14 – Informações da coleta dos resíduos removidos no gradeamento grosseiro

Dia	Vazão ETE (L.s ⁻¹)	Massa total úmida (kg)	Volume (L)	Densidade (kg.L ⁻¹)	Percolado (kg)	Resíduo drenado (kg)
24/05/2012	473,3	29,31	38,26	0,77	2,00	27,31
12/07/2012	691,4	104,37	142,97	0,73	4,66	99,71
04/10/2012	553,2	26,38	33,16	0,80	11,65	14,73
14/11/2012	565,7	33,18	71,41	0,46	1,46	31,72
22/01/2013	578,1	49,19	68,86	0,71	7,94	41,25
22/03/2013	653,9	50,20	76,51	0,66	17,57	32,63
07/06/2013	580,2	26,14	35,81	0,73	2,58	23,56
17/07/2013	600,0	63,61	89,27	0,71	2,58	61,03
23/08/2013	600,0	61,95	82,60	0,75	7,18	54,77
Média	588,4	49,37	70,98	0,70	6,40	42,97
Desvio Padrão	58,1	23,85	32,36	0,09	5,07	24,36

Tabela 3.15 – Informações da coleta dos resíduos removidos no gradeamento fino

Dia	Vazão ETE (L.s ⁻¹)	Massa total úmida (kg)	Volume (L)	Densidade (kg.L ⁻¹)	Percolado (L)	Resíduo drenado (kg)
12/07/2012	691,4	30,20	40,27	0,75	7,74	22,46
14/09/2012	534,0	35,60	53,56	0,66	3,21	32,39
30/10/2012	553,2	53,44	66,31	0,81	4,14	49,30
29/11/2012	536,0	51,78	63,76	0,81	8,51	43,27
16/01/2013	684,1	134,87	191,28	0,71	33,49	101,38
26/03/2013	671,5	133,31	114,74	1,16	44,96	88,35
06/06/2013	597,9	85,77	112,86	0,76	5,59	80,18
16/07/2013	600,0	58,83	74,47	0,79	11,18	47,65
22/08/2013	600,0	57,96	75,27	0,77	1,20	56,76
Média	607,6	71,31	88,06	0,80	13,34	57,97
Desvio Padrão	58,4	36,66	43,29	0,13	14,38	24,98

A Tabela 3.16 apresenta os valores médios da composição, expressa em teor de sólidos, dos resíduos do gradeamento grosseiro antes e após do processo de secagem, ao passo que a Figura 3.5 contém a análise estatística com os resultados dessas determinações.

Tabela 3.16 – Composição, expressa em teor de sólidos, dos resíduos do gradeamento grosseiro antes e após do processo de secagem em estufa agrícola durante 15 dias

Parâmetro	Unidade	Valor médio (n=9)	
		Antes	Após
Umidade	(%)	83,20 ± 2,86	8,91 ± 5,11
Sólidos Totais	(%)	16,80 ± 2,86	91,09 ± 5,11
Sólidos Totais Fixos	(%)	13,54 ± 4,10	14,57 ± 4,27
Sólidos Totais Voláteis	(%)	86,46 ± 4,10	85,43 ± 4,27

n: número de amostras.

Figura 3.5 - Análise estatística para as determinações de umidade e de sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis, em relação à massa de sólidos, para os resíduos removidos no gradeamento grosseiro, antes e após a operação de secagem em estufa.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 3.16 e Figura 3.5, referente ao material removido no gradeamento grosseiro, constatou-se que:

- A maior parcela do teor de sólidos totais é orgânica: em torno de 86,5 % antes do processo de secagem e 85,4% após processo de secagem;
- Os resíduos apresentaram alto teor de umidade (83,20%); e por esse motivo foi realizada a secagem dos mesmos em estufa agrícola, demonstrando que tal processo foi eficaz, tendo em vista que se obteve eficiência média de remoção de umidade de aproximadamente 89%.
- Os resultados de sólidos totais voláteis (80% a 93%) apresentados na Figura 3.5 estão em consonância com os valores relatados na literatura especializada (WEF, 1998), de 70% a 95%, conforme pode ser observado na Tabela 3.4.
- Os resultados obtidos de umidade para os resíduos removidos gradeamento no grosseiro, antes do processo de secagem, encontram-se na faixa de 79% a 87%, conforme pode ser visualizado na Figura 3.5. De acordo com Metcalf & Eddy (2003), para grades com espaçamento entre barras de 25 cm, os valores de umidade são de 50% a 80% (Tabela 3.2). Ressalta-se que o espaçamento entre barras da grade analisada é de 20 cm.

Os valores médios da composição, expressa em teor de sólidos, dos resíduos do gradeamento fino antes e após o processo de secagem estão apresentados na Tabela 3.17 e a Figura 3.6 apresenta-se a análise estatística com os resultados dessas determinações.

Tabela 3.17 – Composição, expressa em teor de sólidos, dos resíduos do gradeamento fino antes e após do processo de secagem

Parâmetro	Unidade	Valor médio (n=9)	
		Antes	Após
Umidade	(%)	83,89 ± 4,49	6,70 ± 2,16
Sólidos Totais	(%)	16,11 ± 4,49	93,30 ± 2,16
Sólidos Totais Fixos	(%)	9,95 ± 2,65	10,29 ± 2,68
Sólidos Totais Voláteis	(%)	90,05 ± 2,65	89,71 ± 2,68

n:número de amostras.

Figura 3.6 – Análise estatística para as determinações de umidade e de sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis, em relação a massa de sólidos, para os resíduos removidos no gradeamento fino, antes e após a operação de secagem em estufa.

Conforme os dados apresentados na Tabela 3.17 e Figura 3.6, referente aos resíduos removidos no gradeamento fino, verificou-se que:

- A maior parcela do teor de sólidos totais é orgânica: cerca de 90% antes do processo de secagem e 89,7% apenas processo de secagem
- Antes do processo de secagem, os resíduos apresentaram alto teor de umidade (83,89)%;
- O processo de secagem dos resíduos na estufa agrícola obteve-se eficiência média de remoção de umidade em torno de 92%.
- Os resultados de sólidos totais voláteis (80% a 94%) apresentados na Figura 3.6 estão em consonância com os valores encontrados na literatura especializada para grades com espaçamento entre barras de 0,8 mm a 3,0 mm, de 68% a 94%, conforme pode ser observado na Tabela 3.4.

Os resíduos de ambos os gradeamento (fino e grosseiro) apresentaram características semelhantes, sendo que os resíduos removidos pelas grades finas apresentaram valores pouco superiores de umidade e de sólidos totais voláteis àqueles obtidos no gradeamento grosseiro.

Outro ponto a ser observado é que, após processo de secagem (15 dias na estufa agrícola), os resíduos removidos no gradeamento fino (6,70%) apresentaram menor teor de umidade em relação aos removidos no gradeamento grosseiro (8,91%).

Por fim, verificou-se que após secagem de 15 dias, os teores de sólidos totais voláteis para resíduos dos gradeamentos grosseiro (85,4%) e fino (89,7%) estão em consonância com os valores obtidos por Le Hyaric *et al.* (2009), que obtiveram, após secagem por uma semana a 80°C, teor de matéria volátil dos resíduos retidos em grades com espaçamento entre barras variando de 3 a 60 mm, de 70,0% a 90,5% de massa seca. Ressalta-se que a secagem ocorreu em períodos diferentes.

Na Figura 3.7 encontram-se os dados de temperatura dentro da estufa agrícola durante o processo de secagem dos resíduos. É oportuno comentar que até outubro de 2012, os dados de temperatura foram obtidos mediante leitura *in loco* quatro vezes ao dia. A partir de então, foi instalado um sistema de coleta de dados de temperatura via cartão SD no formato de planilha MS.Excel.

Figura 3.7 – Acompanhamento da temperatura interna na unidade experimental do tipo estufa agrícola

Na Figura 3.8 apresenta-se a análise estatística da temperatura dentro (interna) e fora (externa) da estufa agrícola. Os resultados dessa análise indicaram que ocorreu maior variação de temperatura dentro da unidade experimental. Além disso, os valores médios para temperatura externa e interna foram, respectivamente, de 23,5°C e 25,8°C, demonstrando que a temperatura dentro da estufa foi pouco superior a do ambiente externo.

Figura 3.8 – Análise estatística das temperaturas externa e interna da unidade experimental

Nas Figuras 3.9 e 3.10 estão apresentados, respectivamente, os resultados das eficiências de redução de massa dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino, após processo de secagem.

Figura 3.9 – Eficiência de redução de massa dos resíduos removidos no gradeamento grosseiro após o processo de secagem.

Figura 3.10 – Eficiência de redução de massa dos resíduos removidos no gradeamento fino após o processo de secagem.

Constatou-se redução significativa das massas dos resíduos após a secagem na unidade experimental: em torno de 75,02% para o gradeamento grosseiro e 80,99% para o gradeamento fino.

A Tabela 3.18 apresenta os valores médios da caracterização do percolato produzido no processo de secagem dos resíduos dos gradeamentos. É importante ressaltar que essa produção pode ser considerada significativa apenas no momento da disposição dos resíduos nas “bacias”; uma vez que durante o restante da secagem a perda de umidade acontece exclusivamente pelo processo de evaporação da água.

Tabela 3.18 – Caracterização do percolato produzido durante o processo de secagem dos resíduos do gradeamento grosseiro e fino

Parâmetro	Unidade	Gradeamento grosseiro		Gradeamento fino	
		Média	Faixa	Média	Faixa
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	699	319 - 1.536	877	235 - 1.997
Coliformes Totais	(UFC100.mL ⁻¹)	1,27E+10	9,80E+6 - 8,10E+10	3,39E+08	1,1E+06 - 1,5E+09
E. Coli	(UFC100.mL ⁻¹)	1,26E+08	9,6E+03 - 5,2E+08	8,14E+07	2,5E+04 - 3,7E+08
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	4.019	110 - 8.518	4.859	1.375 - 12.458
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	9.040	2.960 - 17.680	10.751	2.490 - 23.550
Fosfato total	(mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	150	44 - 329	181	29 - 328
Nitrogênio amoniacal	(mg N.L ⁻¹)	186	95 - 395	228	86 - 618
Nitrogênio Total kjeldhal	(mg N.L ⁻¹)	577	331 - 913	658	251 - 1206
pH	—	6,1	5,81 - 6,46	6,1	5,85 - 6,66
Sólidos sedimentáveis	(ml .L ⁻¹)	20	14.702	30	24.929
Sólidos Totais	(mg. L ⁻¹)	5.130	2.532 - 9.790	5.607	16.87 - 11.998
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	1.233	736 - 1.814	1.150	291 - 1.934
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	3.897	1.796 - 7.976	4.457	1.396 - 10.064
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	2.824	1.020 - 6.125	3.586	593 - 7.833
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	334	120 - 750	355	62 - 817
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	2.490	900 - 5.375	3.230	510 - 7.016
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	2.306	1.459 - 3.665	2.022	737 - 4.165
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	899	615 - 1.503	795	208 - 1.129
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	1.407	844 - 2.601	1.226	67 - 3.048

Nota-se que, apesar de o volume produzido ser relativamente baixo, as concentrações da maioria dos parâmetros analisados são superiores às concentrações usualmente encontradas no esgoto sanitário, como por exemplo, a demanda química de oxigênio (DQO) média no esgoto é em torno de 600 mgO₂.L⁻¹. Nesta pesquisa observou-se que nos percolados produzidos no processo de secagem dos resíduos, a DQO média foi de 9.040 mgO₂.L⁻¹ para o gradeamento grosseiro e de 10.751 mgO₂.L⁻¹ para o gradeamento fino.

Na Tabela 3.19 encontram-se os resultados das análises do poder calorífico e teores de sólidos e cinzas dos resíduos dos gradeamentos grosseiro e fino, após secagem.

Tabela 3.19 – Poder calorífico e teores de sólidos e cinzas dos resíduos removidos nos gradeamentos

Parâmetro	Unidade	Gradeamento Grosseiro		Gradeamento fino	
		Média (n=6)	Desvio padrão	Média (n=6)	Desvio padrão
Porcentagem de sólidos	% p p ⁻¹	98,40	1,21	95,57	6,79
Poder Calorífico Inferior	kcal.kg ⁻¹	4.837	730	5.059	757
Poder Calorífico Superior	kcal.kg ⁻¹	5.219	778	5.464	817
Cinzas (base seca)	% p p ⁻¹	15,91	7,02	9,60	4,37
Cinzas (base úmida)	% p p ⁻¹	15,66	6,88	9,24	4,55

De acordo os resultados apresentados na Tabela 3.19. Verificou-se que:

- Os valores do poder calorífico dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino foram elevados, quando comparados aos valores médios relatados na literatura técnica especializada para resíduos sólidos urbanos e lodo de estação de tratamento de esgoto, conforme apresentados nas Tabelas 3.7 e 3.8, respectivamente;
- Nesse contexto, destaca-se que o valor médio do poder calorífico inferior dos resíduos removidos no gradeamento fino (5.059 kcal.kg⁻¹) foi superior ao resultado obtido para os resíduos retidos na peneira rotativa da ETE de Adelanto– CA – USA de 4.299,23 kcal.kg⁻¹ (Gikas *et al.* 2010);
- O poder calorífico dos resíduos removidos no gradeamento fino foi superior ao do gradeamento grosseiro, tendo em vista que apresenta menor teor de cinzas;
- Os teores de cinzas foram inferiores aos dados obtidos para lodo de estação de tratamento de esgoto (Tabela 3.8) Considerando-se a utilização desses materiais para geração de energia, os resíduos gerados nos gradeamento apresentam melhores condições, visto que tenderia a menor geração de cinzas a serem dispostas em aterros sanitários. Ressalta-se que o menor teor de cinzas está relacionado com a menor quantidade de substâncias inorgânicas;

Cabe comentar que na determinação das análises de poder calorífico e teor de cinzas, foram retirados as pedras e outros materiais que poderiam danificar o equipamento de trituração. Além disso, os resíduos após secagem na estufa agrícola (resíduos dos gradeamento grosseiro e fino com porcentagem de sólidos de 91,1% e 93,3%, respectivamente) foram encaminhados estufa de laboratório a 105°C, durante 24 horas para secagem complementar.

Diante do exposto, constatou-se que a geração de energia a partir dos resíduos removidos nos gradeamentos de estações de tratamento de esgoto é tecnicamente viável, quando comparada com as referências existentes na literatura, o que pode ser corroborado pelo índice de PCI, indicado pela EPE, que condiciona a viabilidade a valores maiores que $2.000 \text{ kcal.kg}^{-1}$, desde que o resíduo seja previamente secado.

Com os resultados obtidos do poder calorífico e do teor de sólidos totais dos resíduos removidos em cada gradeamento foi possível determinar a quantidade potencial de energia que pode ser gerada com a queima desses resíduos, em equipamentos usualmente empregados com essa finalidade, lembrando que a queima do material decorre também na geração de cinzas. Na Tabela 3.20 encontram-se os resultados da geração de energia e cinzas para cada tipo de gradeamento. Ressalta-se que para os cálculos considerou-se 20% de eficiência na conversão para energia elétrica.

Tabela 3.20 – Produção de energia e cinzas no processo de queima dos resíduos removidos nos gradeamentos

Tipo de gradeamento	Massa bruta (t)	Material seco ¹ (kg)	Material seco ² (kg)	Energia potencial (kcal)	Energia gerada (kcal)	Energia gerada (kW.h)	Quantidade de cinzas (kg)
Grossoiro	1,0	153,0	137,0	662.820	132.564	154	21,8
Fino	1,0	150,3	134,0	678.023	135.605	158	12,9

¹ refere-se a massa de sólidos após a operação de secagem em estufa agrícola durante 15 dias.

² refere-se a massa de sólidos em estufa de laboratório a 105°C após 24 horas, procedimento utilizado para determinação do poder calorífico.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.20 e da quantidade média dos resíduos removidos na ETE Monjolinho, estimou-se a geração mensal de energia com a queima desse tipo de material, obtendo valor de aproximadamente 1.094 kW.h (463 kW.h para os resíduos do gradeamento grossoiro e 631 kW.h para os resíduos do gradeamento fino).

Cabe enfatizar que a geração de energia utilizando apenas os resíduos removidos nos gradeamento da estação de tratamento de esgoto não seria rentável, tendo em vista sua baixa produção e o elevado custo de implantação de equipamentos para esse fim. Uma possível solução para viabilizar a queima desses resíduos, seria enviá-los às centrais de geração de energia de resíduos sólidos urbanos.

Outra solução seria o aproveitamento do poder calorífico do material combustível existente nos resíduos do gradeamento para promover a secagem do lodo gerado nos processos biológicos da ETE. No Brasil, apesar da pouca utilização, a secagem térmica surgiu

como atraente alternativa visando à redução no volume e/ou reaproveitamento do lodo, devido à crescente quantidade de lodo produzido, aliada a pouca disponibilidade de aterros sanitários.

Os custos de implantação e operação de um sistema de secagem térmica são, a princípio, relativamente elevados e envolvem a utilização de combustível para geração de calor. A utilização do biogás e dos resíduos gerados na própria ETE e o uso do biossólido na agricultura podem diminuir esses custos.

Nesse contexto, algumas ETEs já estão empregando unidades de secagem térmica capazes de operar com duas fontes de energia térmica. Dessa forma, é prevista a utilização de combustível o próprio Biogás gerado nos UASBs e/ou gás GLP, além de permitir também a queima de resíduos (como o próprio lodo seco e/ou resíduos removidos no gradeamento), como complemento para a geração de energia térmica para a secagem do lodo.

O balanço de massa geral do aproveitamento dos resíduos deve considerar as principais variáveis envolvidas na geração de energia, como a produção de cinzas, seu transporte e disposição. Nessa condição, na Tabela 3.21 apresenta-se o resumo desse balanço para os resíduos da ETE Monjolinho.

Tabela 3.21 – Resumo do balanço mensal para aproveitamento dos resíduos removidos no gradeamento da ETE Monjolinho

Tipo de gradeamento	Aproveitamento dos resíduos				
	Energia gerada (kW.h)	Quantidade de cinzas (kg)	Valor energético (R\$)	Transporte e disposição das cinzas (R\$)	Resultado (R\$)
Grossoiro	463	65,4	185,15	10,47	174,68
Fino	631	51,5	252,53	8,23	244,29
Total	1.094	116,9	437,7	18,7	419,0

Nota: Considerou-se custo energia de 0,40 R\$.kWh⁻¹ (Data de referência- Maio 2014)

Nas Figuras 3.11 3.12 estão apresentados os resultados médios das caracterizações físicas dos resíduos do gradeamento grossoiro e fino, respectivamente. Para verificar a influência da precipitação na composição dos resíduos dividiram-se em dois grupos as caracterizações físicas: sem precipitação (as amostras foram coletadas em dias que não ocorreram chuvas) e com precipitação, neste caso, ocorrem chuvas durante a coleta dos resíduos.

De acordo com as Figuras 3.11 e 3.12, observou-se para ambas as caracterizações físicas, que a grande porcentagem dos resíduos corresponde à matéria orgânica tanto em termos de massa como de volume. Esses resultados corroboram com os apresentados na Tabela 3.17, em que a maior parcela dos sólidos totais é orgânica.

Também, verificou-se maior porcentagem de pedras nas caracterizações físicas das amostras coletadas quando ocorreu precipitação. Sendo mais significativa na composição dos resíduos removidos no gradeamento grosseiro, em que o percentual de pedra em massa foi de 13% sem precipitação e de 42% com precipitação.

Ressalta-se que a grande maioria das pedras coletadas referiu-se as placas de precipitados (contendo enxofre, cálcio, gorduras solidificadas, etc.), e não ao agregado graúdo (brita) utilizado na construção civil, portanto, esse material não tem potencial para aproveitamento.

Caracterização física dos resíduos do Gradeamento grossoiro - Geral

Caracterização física dos resíduos do Gradeamento grossoiro - sem precipitação

Caracterização física dos resíduos do Gradeamento grossoiro - com precipitação

Figura 3.11 – Caracterizações físicas dos resíduos do gradeamento grossoiro em termos de massa e de volume

Caracterização física dos resíduos do Gradeamento fino - Geral

Caracterização física dos resíduos do Gradeamento fino - sem precipitação

Caracterização física dos resíduos do Gradeamento fino - com precipitação

Figura 3.12 – Caracterizações físicas dos resíduos do gradeamento fino em termos de massa e de volume

Na Figura 3.13 apresenta-se análise estatística do percentual de matéria orgânica putrescível encontrada na caracterização física em massa dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino.

Figura 3.13 – Análise estatística do percentual de matéria orgânica putrescível presente nos gradeamentos grosseiro e fino

De acordo com Figura 3.13, observou-se que os resíduos do gradeamento fino apresentaram maiores valores de matéria orgânica que os resíduos do gradeamento grosseiro.

Também, verificou-se maior variação no teor de matéria orgânica para os resíduos removidos no gradeamento grosseiro (38,6% a 84,8%) em relação aos resíduos do gradeamento fino (59,8% a 91,0%), o que pode ser explicado pelo fato que quando ocorre precipitação aumenta a quantidade de pedras e, conseqüentemente, diminui o teor de matéria orgânica nas amostras coletadas.

Na Figura 3.14 apresenta-se análise estatística do percentual de plástico para a caracterização física em massa dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino.

Figura 3.14 – Análise estatística do percentual de plástico presente nos gradeamentos grosso e fino.

Conforme análise estatística do percentual de plásticos, constatou-se que os valores das medianas e dos quartiz (25% e 75%) foram próximos para ambos os resíduos, indicando que houve pouca variação nas diferentes épocas do ano. Também, observou-se maior percentual desse componente nos resíduos do gradeamento fino (mediana de 6,78%) em relação aos resíduos do gradeamento grosso (mediana de 5,24%).

Na Figura 3.15 apresenta-se análise estatística do percentual de papel encontrado na caracterização física em massa dos resíduos removidos nos gradeamentos grosso e fino. De acordo os dados apresentados na Figura 3.15, verificou-se que os resíduos do gradeamento grosso apresentaram maior percentual de papel. Para os resíduos dos gradeamentos grosso e fino, as medianas do percentual de papel foram, respectivamente, de 1,0 % e 0,6%.

Figura 3.15 – Análise estatística do percentual de papel presente nos gradeamentos grosso e fino.

Na Figura 3.16 apresenta-se análise estatística do percentual de tecidos encontrado na caracterização física em massa dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino.

Figura 3.16 – Análise estatística do percentual de tecido presente nos gradeamentos grosseiro e fino.

Com base nos resultados obtidos na análise estatística do percentual de tecido, verificou-se maior quantidade desse componente nos resíduos do gradeamento grosseiro, tendo em vista que 50% das amostras coletadas apresentaram valores superiores a 3,5%. Para os resíduos removidos no gradeamento fino, a mediada do percentual de tecido foi de 1,3%.

Na Figura 3.17 apresenta-se análise estatística do percentual de “pedras” encontrado na caracterização física em massa dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino.

Figura 3.17 – Análise estatística do percentual de tecido presente nos gradeamentos grosseiro e fino

Conforme comentado anteriormente, a presença de “pedras” nos resíduos está diretamente relacionada com a precipitação, sendo sua ocorrência mais significativa na composição dos resíduos removidos no gradeamento grosseiro. Isto explica a maior variação do percentual de pedra apresentado na Figura 3.17 para os resíduos do gradeamento grosseiro (7,6% a 48,8%).

3.4. Conclusões

A partir dos resultados da parte experimental desta pesquisa, podem ser estruturadas as seguintes conclusões principais:

- As caracterizações dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino demonstraram que os mesmos apresentam altos teores de umidade (83,20% para o gradeamento grosseiro e 83,89% para o gradeamento fino) e percentuais elevados da fração orgânica dos sólidos totais (em torno de 86,5 % e 90% para os gradeamentos grosseiro e fino, respectivamente);
- Com relação à unidade experimental do tipo estufa agrícola utilizada para a secagem dos resíduos, pode-se concluir que atendeu ao objetivo previsto, uma vez que obteve eficiências médias de remoção de umidade de aproximadamente 89% e 92% para os resíduos do gradeamento grosseiro e fino, respectivamente;
- As análises de poder calorífico e teor de cinzas demonstraram a potencialidade da geração de energia a partir dos resíduos removidos nos gradeamentos de estações de tratamento de esgoto, tendo em vista os elevados resultados do poder calorífico inferior ($4.837 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para resíduos do gradeamento grosseiro e $5.059 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para resíduos do gradeamento fino) e baixos valores na geração de cinzas (15,91% para resíduos do gradeamento grosseiro e 9,60% para resíduos do gradeamento fino). Ressalta-se que o maior poder calorífico inferior dos resíduos removidos no gradeamento fino está relacionado ao fato do mesmo apresentar maior teor de sólidos voláteis e menor teor de cinzas;
- Ainda em relação às análises do poder calorífico dos resíduos removidos nos gradeamentos de ETEs, constatou-se que os resultados foram superiores aos valores médios relatados na literatura técnica especializada para resíduos sólidos urbanos e lodo de estação de tratamento de esgoto. Assim, demonstra-se a importância de novos estudos e pesquisas voltadas ao aproveitamento desses resíduos.

- As caracterizações físicas dos resíduos do gradeamento grosseiro e fino confirmaram a maior porcentagem de matéria orgânica presente nos resíduos. Também, foi possível constatar, a partir da análise estatística, que ocorreu grande variação dos componentes coletados em diferentes épocas do ano, indicando forte influência da precipitação na quantidade de pedras presentes nas amostras.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

4. APROVEITAMENTO DO MATERIAL SEDIMENTÁVEL REMOVIDO EM DESARENADOR

4.1. Levantamento Bibliográfico

4.1.1. Generalidades

Neste capítulo encontra-se abordagem geral sobre a potencialidade da utilização da areia removida em desarenadores de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) na construção civil, em substituição à areia comercial comum. Como compreende temas distintos, procurou-se neste texto proporcionar ao leitor referências mínimas, em nível apenas suficiente para embasamento conceitual e prático da pesquisa.

Inicialmente, apresentam-se as principais características do material sedimentável removido nos desarenadores e as alternativas usuais para tratamento e disposição deste tipo de resíduo. A seguir, é feita breve abordagem sobre a legislação pertinente para aproveitamento da areia removida nos desarenadores de ETEs.

Por fim, são apresentadas as propriedades dos agregados utilizados na construção civil e as principais características dos concretos e argamassas.

Neste capítulo apresentam-se também os procedimentos experimentais desta pesquisa, a análises de resultados e as pertinentes conclusões.

4.1.2. Caracterização do material sedimentável removido nos desarenadores

O material sedimentável removido nos desarenadores de ETEs (genericamente denominado de areia) é, em sua maioria, constituído de material mineral, como areia, pedrisco, silte, escória e cascalho. Esse material geralmente contém matéria orgânica putrescível, como vegetais (grãos de café, grãos de feijão, frutas e verduras), gorduras, cascas de ovos, pedaços de ossos, penas de aves etc. É comum a presença de cabelos, plásticos e fibras (têxteis, palhas, piaçavas).

A finalidade da remoção desse material no tratamento de esgoto é a de minimizar efeitos adversos ao funcionamento das partes componentes das instalações a jusante, bem como impactos nos corpos receptores, principalmente devido ao assoreamento.

A quantidade de areia presente no esgoto bruto depende de vários fatores, dentre eles podem-se destacar: tipo de sistema de coleta e transporte de esgoto (se o sistema é combinado ou separador absoluto); tipo de ocupação da bacia atendida pelo sistema de coleta; condições

de conservação do sistema de coleta e transporte; e tipo de solo da bacia coletora de esgoto (METCALF & EDDY, 2003). As condições climáticas, tais como regiões de alta ou baixa pluviometria, e proximidade com regiões litorâneas ou com solo arenoso fino também são fatores influenciáveis na quantificação e qualidade dos detritos retidos nos desarenadores.

No Brasil, a maioria dos sistemas de coleta – pelo menos conceitualmente – é do tipo separador absoluto. Contudo, na grande maioria dos casos, o estado de conservação das redes e coletores e a ocorrência de ligações clandestinas de águas pluviais nas mesmas são os principais determinantes para a quantidade de areia presente no esgoto sanitário (PRADO, 2006).

Segundo Metcalf e Eddy (2003) a interpretação de dados de eficiências de remoção de areia é tarefa difícil, devido à escassez de informações corretas e poucos dados disponíveis sobre a caracterização do material removido. O parâmetro, geralmente utilizado para controle da eficiência dos desarenadores é a remoção de partículas maiores ou iguais a 0,2 mm. Entretanto, conhecer apenas o tamanho das partículas removidas não é suficiente para determinar a eficiência de um desarenador; faz-se necessário, também, caracterizar qualitativamente e quantitativamente o afluente (esgoto bruto gradeado ou peneirado) e o efluente dos desarenadores. Somado a isso, é importante conhecer a distribuição granulométrica e a composição do resíduo removido devido à sua heterogeneidade.

Apesar da falta de informações acerca da eficiência de remoção de areia nos desarenadores, existem alguns indicadores como referência para a avaliação do desempenho dessas unidades, tais como (JORDÃO e PESSOA, 2005):

- Quantidade de areia removida: recomenda-se utilização do valor médio compreendido entre 20 a 40 litros de areia por 1.000 m³ de esgoto tratado. Valores acima de 150 litros por 1.000 m³ indicam prováveis infiltrações excessivas na rede de esgoto. Valores abaixo de 10 litros por 1.000 m³ indicam prováveis falhas de projeto ou operação inadequada ou outros fatores influentes.
- Teor de sólidos voláteis: o valor limite tolerável é 30% em relação aos sólidos totais. Valores superiores a esse indicam excesso de detritos sedimentados devido a problemas operacionais ou falha de projeto.
- Teor de umidade: usualmente, o teor de umidade e o peso específico da areia devem estar compreendidos, respectivamente, entre 20 a 30% e 1.400 a 1.700 kg m⁻³.

Segundo Metcalf & Eddy (2003) a quantidade média de areia removida é cerca de 15 litros por 1000 m³ de esgoto tratado (evidentemente, tomando como referência cidades dos

Estados Unidos). Sendo que essa remoção pode variar de 3,74 a 201,96 litros por 1000 m³ de esgoto tratado.

Jordão e Pessoa (2005) descrevem a quantificação de areia segundo várias referências de literatura (Tabela 4.1). Water Environment Federation (1998) apresentam dados da quantificação de areia, obtidos de levantamento feito em vinte e duas ETEs dos Estados Unidos, que recebem esgoto de sistema de coleta do tipo separador absoluto os dados levantados da quantificação do resíduo removida no desarenador (Tabela 4.2).

Tabela 4.1 – Quantificação de areia segundo várias referências de literatura

Autor ou referência	Origem	Faixa L. (1000 m ³) ⁻¹		Média L.(1000 m ³) ⁻¹
		Mínimo	Máximo	
Mara, D.	Escocesa	-	170	50 a 100
Metcalf & Eddy	Americana	0,3	180	-
Imhoff, K. (1)	Alemã	68	160	-
Dégremont (1)	Francês	-	160	-
Azevedo & Hess	Brasileira	13	40	15 a 29
ETE Pinheiros (2)	Brasileira	3	73	41
ETE Vila Leopoldina (2)	Brasileira	-	22	12

(1) Valores transformados com base em 200 L.hab⁻¹.d⁻¹ (2) Valores reais medidos entre jan/76 e mar/77
Fonte: Jordão e Pessoa (2005).

Tabela 4.2 – Dados da quantificação de areia, obtidos de levantamento feito em vinte e duas ETEs dos Estados Unidos, que recebem esgoto de sistema de coleta do tipo separador absoluto

ETEs dos EUA	Vazão (m ³ .dia ⁻¹)	Areia L.(1000 m ³)	Areia (L.dia ⁻¹)
Norwalk	44.474	25	1.112
Portsmouth	36.715	3	110
East Hartford	15.140	18	273
Oklahoma City	94.625	15	1.419
Waterbury	56.775	30	1.703
Duluth	45.420	6	273
East Bay	484.480	9,5	4.578
Chicago	3.440.000	3,1	10.578
New York (Jamaica)	378.500	16,8	6.359
New York (Port Richmond)	227.100	3,8	852
New York (North River)	832.700	11,3	9.368
Boston	423.920	5,1	2.162
St. Louis	632.095	20,2	12.753
Passaic Valley Treatment Plant	851.625	28,7	24.399
Allegheny County	757.000	24,9	18.849
Forth Worth	170.325	9,7	1.648
County of Milwaukee	454.200	3,6	1.635
Twin City Metro	825.130	36,2	29.828
San Jose	541.255	18,8	10.149
Los Angeles (Hyperion)	1.589.700	15	23.846
Santa Rosa	45.420	37,5	1.703
Livermore	23.656	7,5	177

Fonte: Adaptado Water Environment Federation (1998).

A título de ilustração, alguns valores a respeito das taxas de geração de resíduos no desarenador em Estações de Tratamento de esgoto brasileiras são apresentados a seguir:

- ETE Piçarrão (Campinas – SP), apresentou remoção média mensal nos anos de 2007 e 2008 de $42 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$, sendo esses dados disponibilizados pelo Setor de Operação de Esgoto da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S.A. (SANASA) de Campinas – SP;
- ETE Dr. Hélio Seixo de Britto (usualmente chamada ETE-Goiânia) apresentou remoção em torno de $13 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$ nos meses de janeiro a dezembro de 2005 (SILVIA e CARVALHO, 2007).

O material removido pelos desarenadores possui, geralmente, entre 35% a 80% de sólidos na fase seca, e de 1% a 55% de sólidos voláteis (WATER ENVIRONMENT FEDERATION, 1998). Segundo os dados disponibilizados, por exemplo, sobre a ETE de Dr. Hélio Seixo de Britto (ETE-Goiânia), a porcentagem de sólidos voláteis na areia retida, nos meses de julho a outubro, foi de 41,3% em relação aos sólidos totais; e nos meses de novembro e dezembro, essa porcentagem foi da ordem de 9%.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 estão apresentados, respectivamente, dados sobre a caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos removidos nos desarenadores de Estações de Tratamento de Esgoto no Estado do Paraná. Os desarenadores da ETE 01 Norte Maringá e ETE da Pinhalzinho Umuarama são do tipo ciclônico *vórtex* com remoção mecanizada de areia por meio de *air lift*. Enquanto que o desarenador da ETE 02 Sul Maringá é do tipo quadrado em planta com remoção mecanizada de areia por meio de raspagem de fundo com braços duplos de movimento circular.

Tabela 4.3 – Caracterização quantitativa dos resíduos removidos nos desrenadores de duas ETEs em Maringá-PR

Local	Faixa $\text{L} \cdot (1000 \text{ m}^3)^{-1}$		$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
	Faixa	Média	
ETE 01 Norte	23,17-183,90	85,32	0,23
ETE 02 Sul	28,04 – 106,78	63,02	0,23

Fonte: Tomiello (2008).

Tabela 4.4– Caracterização qualitativa dos resíduos removidos nos desarenadores de três ETes do Paraná-PR

Parâmetro	Unidade	ETE 01 Norte Maringá	ETE 02 Sul Maringá	ETE Pinhalzinho Umuarama
Umidade	%	84,18	58,93	34,59
Matéria orgânica total	%	85,63	58,07	17,93
Carbono orgânico total	%	14,37	41,93	82,07
Resíduo mineral total	%	47,57	32,26	9,96
Sólidos totais (ST)	mg.L ⁻¹	143.016	240.719	628.627
Sólidos totais fixos (STF)	mg.L ⁻¹	23.352	100.913	516.023
Sólidos totais voláteis (STV)	mg.L ⁻¹	119.664	139.806	112.604
Relação SV/ST	%	83,67	58,07	17,93
Densidade	g.mL ⁻¹	1,0061	1,0015	1,0214
Demanda química de oxigênio	mg.L ⁻¹	30.312	8.100	14.749
potencial hidrogeniônico (pH)	-	5,50	7,00	5,68

Fonte: Tomiello (2008).

Yamane (2007) realizou caracterização microbiológica do resíduo removido nos desarenadores das ETes Bandeirantes e Marcílio de Noronha, localizadas em Vitória - ES. De acordo com os resultados (Tabela 4.5), verificou-se que esse tipo de resíduo apresenta grande contaminação biológica, indicando a necessidade de tratamento com o objetivo de reduzir significativamente a densidade de micro-organismos patogênicos.

Tabela 4.5 – Análises microbiológicas e teor de unidade do resíduo do desarenador removido nos desarenadores das ETes Bandeirantes e Marcílio de Noronha, localizadas em Vitória -ES

Coliformes Totais (NMP.100g ⁻¹)	E. Coli (NMP.100g ⁻¹)	Ovos de Helmintos (ovos.g ⁻¹ MS)	Umidade (%)
> 2419,2	2,7 x 10 ⁶	0,6	25,5

Notas: As análises de Coliformes Totais e *E.coli* foram realizadas na diluição (-4)

>2419,2 indica que na diluição adotada os valores extrapolam o limite de detecção do método

NMP.100g⁻¹ – Número Mais Provável por 100g de areia seca

Ovos.g⁻¹MS – número de ovos por grama de massa seca

Fonte: Yamane (2007).

Tomiello (2008) realizou ensaio de granulometria e, em seguida, efetuou análise da fração orgânica (MOt) e mineral (RMt) das frações retidas nesse ensaio do resíduo removido

no desarenador da ETE 02 Sul Maringá-PR. Os valores encontrados nas análises e os respectivos pesos das frações retidas nas peneiras são apresentados na Figura 4.1. A maior quantidade de resíduo ficou retida na peneira com abertura de 0,600 mm, seguida da peneira com abertura de 2,4 mm, fração essa que apresenta grande quantidade de matéria orgânica (62,02%). A maior concentração de resíduos minerais nas frações retidas ocorreu nas peneiras de abertura maior, menor e no fundo, em consequência de que nas peneiras maiores ficam retidos resíduos como pedras e seixos e nas peneiras menores e no fundo são retidos a areia, silte e argila.

Figura 4.1 – Análise da composição das frações orgânicas e minerais retidas nas peneiras no ensaio de granulometria dos resíduos do desarenador da ETE 02 Sul Maringá-PR

Fonte: Tomiello (2008).

Neste texto também tomou-se como referência, sobre a granulometria dos resíduos dos desarenadores, três ETES da região litorânea do Estado de São Paulo: Monguaguá, Guarajá e Bertioxa. De acordo com a classificação granulométrica, os resíduos apresentaram as seguintes porcentagens médias: 0,11% de seixos, 0,19% de grânulos, 96,93% de areia, 1,81% de silte e 0,94% de argila, conforme apresentadas na Tabela 4.6. A maior quantidade de resíduo ficou retida na peneira com abertura de 0,0880 mm (areia muito fina), seguida da peneira com abertura de 0,125 mm (areia fina).

Tabela 4.6 – Distribuição granulométrica dos resíduos removidos nos desarenadores de ETEs da região litorânea do Estado de São Paulo, ensaios realizados em Janeiro de 2009

Fração	Peneira (mm)	Porcentagem retida em cada peneira (%)			Média
		ETE Bichoró Monguaguá	ETE Vila Zilda Guarujá	ETE Bertiooga	
Seixo	4,000	0,32	0,00	0,00	0,11
Grânulo	2,800	0,14	0,00	0,00	0,05
	2,000	0,39	0,04	0,01	0,15
	1,400	0,23	0,37	0,01	0,20
	1,000	0,74	2,02	0,12	0,96
	0,710	1,26	5,08	0,26	2,20
Areia	Grossa	0,500	3,19	0,67	2,00
	Média	0,350	1,09	1,18	1,47
		0,250	3,90	2,53	2,89
	Fina	0,177	21,71	3,86	10,91
		0,125	42,24	13,62	31,89
	Muito Fina	0,088	21,60	69,74	41,93
		0,062	0,88	5,36	2,47
	Grosso	0,031	0,79	0,97	0,88
	Médio	0,020	0,33	0,50	0,48
	Fino	0,006	0,22	0,27	0,28
Silte	Muita Fino	0,004	0,11	0,16	0,17
	Argila	<0,004	0,86	0,70	0,94

Fonte: <http://www.abes-dn.org.br/eventos/abes/1oficina-tratamento-preliminar>.

Nas Tabelas 4.7 e 4.8 encontram-se, respectivamente, as análises físico-químicas dos ensaios de solubilização e lixiviação do resíduo removido nos desarenadores de três ETEs do Estado do Paraná. De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos foram classificados como Classe IIA, ou seja, não perigosos e não inertes. Nenhum dos parâmetros do lixiviado excedeu aos valores máximos permitidos do anexo F da NBR 10.004 (Tabela 4.8), entretanto, alguns parâmetros do solubilizado foram superiores aos valores limites do anexo G da NBR 10.004, e por isso foi considerado como não inerte (Tabela 4.7).

Tabela 4.7– Análises físico-químicas do extrato solubilizado dos resíduos do desarenador removido nos desarenadores de três ETEs do Estado do Paraná

Parâmetro	Unidade	ETE Belém Curitiba-PR	ETE Atuba Sul Curitiba-PR	ETE 02 Sul Maringá-PR	Limite máximo solubilizado*
pH	-	6,52	6,43	6,72	6,0 a 9,5
Turbidez	NTU	2,0	20,0	11,1	5,0
Cor real	mg Pt-CO.L ⁻¹	4,0	31,0	492,0	10,0
SDT	mg L ⁻¹	394,0	880,0	1018,0	1000,0
Sulfato	mg SO ₄ ²⁻ .L ⁻¹	20,90	15,00	6,75	250,0
Cianeto	mg CN ⁻ .L ⁻¹	0,005	0,073	0,036	0,070
Nitrato	mg.L ⁻¹	39,6	215,8	6,5	10,0
Cloreto	mg Cl.L ⁻¹	42,6	142,0	41,0	250,0
Fluoreto	mg F ⁻ .L ⁻¹	<0,1	8,70	2,68	1,50
Dureza total	mg CaCO ₃ ⁻ .L ⁻¹	215,0	629,0	295,0	500,0
Fenóis	mg C ₆ H ₅ OH L ⁻¹	0,070	0,130	0,119	0,010
Surfactantes	mg LAS.L ⁻¹	0,080	0,120	3,975	0,500
Arsênio	mg As L ⁻¹	0,003	0,002	-	0,010
Bário	mg Ba.L ⁻¹	<0,7	<0,7	0,930	0,700
Cádmio	mg Cd.L ⁻¹	0,009	0,001	0,067	0,005
Chumbo	mg Pb.L ⁻¹	0,012	0,011	0,004	0,010
Cromo	mg Cr.L ⁻¹	0,014	0,017	0,065	0,050
Mercúrio	mg Hg.L ⁻¹	0,001	0,000	-	0,001
Prata	mg Ag.L ⁻¹	<0,001	<0,001	0,421	0,050
Selênio	mg Se.L ⁻¹	0,001	0,001	-	0,010
Alumínio	mg Al.L ⁻¹	0,450	0,390	0,752	0,200
Cobre	mg Cu.L ⁻¹	0,230	0,520	0,018	2,0
Ferro	mg Fe.L ⁻¹	6,400	6,100	50,763	0,300
Manganês	mg Mn.L ⁻¹	0,500	<0,1	0,814	0,100
Sódio	mg Na.L ⁻¹	43,100	40,200	13,643	200,0
Zinco	mg Zn.L ⁻¹	1,460	1,690	0,085	5,0

*valores limites constantes no anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Fonte: adaptado Tomiello (2008).

Tabela 4.8 – Análises físico-químicas do extrato lixiviado dos resíduos do desarenador removido nos desarenadores de três ETEs do Estado do Paraná

Parâmetro	Unidade	ETE Belém Curitiba-PR	ETE Atuba Sul Curitiba-PR	ETE 02 Sul Maringá-PR	Limite máximo lixiviado*
pH	-	5,1	5,2	-	-
Fluoreto	mg F.L ⁻¹	0,41	30,0	1,0	150,0
Alumínio	mg Al.L ⁻¹	-	-	1,843	-
Arsênio	mg As.L ⁻¹	0,012	0,022	-	1,0
Bário	mg Ba.L ⁻¹	<1	<1	2,1881	70,0
Cádmio	mg Cd L ⁻¹	0,080	0,007	0,004	0,5
Chumbo	mg Pb.L ⁻¹	0,081	0,084	0,029	1,0
Cobre	mg Cu L ⁻¹	-	-	0,054	
Cromo	mg Cr.L ⁻¹	0,038	0,043	0,139	5,0
Mercúrio	mg Hg.L ⁻¹	0,001	0,002	-	0,1
Prata	mg Ag.L ⁻¹	<0,001	<0,001	0,664	5,0
Ferro	mg Fe.L ⁻¹	-	-	1,969	-
Manganês	mg Mn.L ⁻¹	-	-	1,050	-
Sódio	mg Na.L ⁻¹	-	-	1.828,228	-

*valores limites constantes no anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004)

Fonte: adaptado Tomiello (2008).

Com dados levantados na literatura consultada, sobre os resíduos removidos nos desarenadores, constata-se uma grande variação dos parâmetros quantitativos e qualitativos nos mesmos. Essa heterogeneidade pode ser responsável por problemas operacionais da unidade, uma vez que o dimensionamento dos sistemas feito pelos projetistas é, em sua maioria, baseado em valores típicos encontrados na literatura exterior, como, por exemplo, os dados apresentados por Metcalf e Eddy (2003). Assim, considera-se como ideal que, para cada estação, se faça o levantamento das características principais do esgoto (DBO, DQO, fósforo, nitrogênio e sólidos), bem como se conheça os resíduos a serem removidos em seus desarenadores (baseado em ensaios com peneiras de diferentes aberturas e quantificação de material retido).

4.1.3. Tratamento e disposição do material sedimentável removido nos desarenadores

A disposição da areia removida no desarenador deve ser cuidadosamente monitorada, pois a mesma apresenta potencial ofensivo para a saúde humana e para o meio ambiente em consequência de suas características. Usualmente, tem-se como disposição final os aterros

sanitários e lixões, ou então, o seu descarte, sem nenhum cuidado, nos jardins das próprias ETEs ou em estradas não pavimentadas (valas), taludes, erosões, etc.

Existem alguns tipos de tratamento para os resíduos removidos nos desarenadores de ETEs (similar aos realizados nos resíduos do gradeamento), com intuito de reduzir o seu volume, controlar a exalação de odores e proliferação de moscas e facilitar seu manuseio e destinação final. Tais operações são listadas a seguir:

- Lavagem: podem ser utilizados equipamentos mecânicos para reduzir o percentual de matéria orgânica presente no resíduo. Esses equipamentos promovem a separação, lavagem, desaguamento e transporte da areia (Figura 4.2). O princípio de seu funcionamento baseia-se na alimentação tangencial da mistura líquido-sólido, provocando a formação de um *vórtex* descendente, onde as partículas maiores e mais densas são projetadas contra a parede, de forma a promover a separação natural das partículas maiores das menores. As partículas mais densas são encaminhadas a uma rosca do tipo parafuso que transporta a areia para caçambas.
- Secagem (desaguamento): tem como finalidade a redução do volume devido aos inconvenientes do transporte e disposição do material úmido. Nessa operação, a água livre presente na areia, lavada ou não, pode ser retirada através de secagem natural, com a utilização de estufas agrícolas, ou através de dispositivos mecânicos (geralmente incorporados ao sistema de lavagem) em estações maiores.
- Controle de odor e de proliferação de insetos: apesar do resíduo removido no desarenador ser tipicamente mais inerte que os resíduos do gradeamento, esses ainda contém certa quantidade de matéria orgânica que pode sofrer decomposição e, conseqüentemente, se tornar fonte de odores desagradáveis ou proliferação de insetos. Dessa forma, para controlar tal inconveniente podem ser aplicadas as mesmas técnicas utilizadas para os resíduos do gradeamento.

Figura 4.2 - Desenho esquemático dos componentes de um lavador de areia.

Fonte: Catálogo Huber.

No Brasil, a prática comum no que se refere ao descarte da areia proveniente de ETEs é a de se dispô-la no próprio terreno da estação (enterramento ou empilhamento) ou encaminhá-la para aterros; de forma geral, não há preocupação relacionada às potencialidades associadas ao seu aproveitamento direto, redução ou recuperação do volume gerado e impactos ambientais. A disposição em aterros brasileiros, além de representar custo da ordem de R\$ 160 t⁻¹ (referência: ETE Mojolinho São Carlos-SP, maio de 2014, contabilizados gastos somente com transporte e disposição), ocupa volume que poderia ser efetivamente destinado aos resíduos domésticos.

A título de comparação, nos Estados Unidos, em algumas grandes estações de tratamento de esgoto, o resíduo dos desarenadores é incinerado conjuntamente com outros sólidos, tais como: material gradeado e lodos biológicos diversos. Em alguns estados americanos, existem leis ambientais que obrigam a estabilização com cal antes da disposição em aterro sanitário (METCALF & EDDY, 2003).

As possibilidades de reutilização ou reaproveitamento da areia em estado bruto, ou seja, sem lavagem, secagem e classificação são praticamente inexistentes. Entretanto, a

utilização da mesma na construção civil pode ser uma opção desde que seja realizada a higienização com o objetivo de eliminar ou reduzir significativamente a densidade de micro-organismos patogênicos, tornando-a segura do ponto de vista microbiológico para as possíveis aplicações desejadas.

Dentre os processos de higienização existentes, a caleagem e a cloração, por serem econômicas e de fácil aplicação, são bastante conhecidas com utilização em lodo de estações de tratamento de água e esgoto.

Yamane (2007) desenvolveu estudo sobre higienização de resíduos oriundos de desarenadores. Para tanto, foram avaliados os métodos da caleagem, cloração e insolação natural por meio da eficiência de remoção de bactérias do grupo coliforme e de ovos de helmintos. Com os resultados desse estudo (Tabela 4.9), a autora demonstra que a caleagem foi o método de tratamento que apresentou os melhores resultados em relação à redução de bactérias e ovos de helmintos nas condições analisadas. As amostras que receberam apenas “reviramento diário” e insolação natural (areia controle) apresentaram o menor decaimento bacteriano. As amostras de areia submetidas à cloração com cloro granular e água sanitária não obtiveram 100% de eficiência na redução dos coliformes totais e *E.coli* (decaimento de 2 a 4 unidades logarítmicas para *E.coli*).

Nesse estudo, também foi avaliada a potencialidade da caleagem do resíduo do desarenador nas proporções de 15%, 20%, 25% e 30% de cal hidratada (em relação ao peso úmido da areia) como material alternativo na construção civil. Assim, pode-se concluir que a caleagem a partir da concentração de 10% de cal hidratada (em relação ao peso úmido da areia) foi considerada eficiente na remoção de bactérias e ovos de helmintos, após uma semana de tratamento, resultando num material higienizado, com possibilidades de ser utilizado na construção civil, em substituição às areias convencionais, incorporado a argamassas em geral. Ressalta-se que não foram preparados corpos de prova e nem efetuados ensaios nos mesmos (resistências, absorção, solubilização, lixiviação) para verificar a qualidade e uniformidade da argamassa produzida a partir da areia removida em desarenador. Os resultados dos principais parâmetros utilizados em seu trabalho estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Análises microbiológicas para os diferentes métodos de higienização do resíduo removido no desarenador

Pilhas	Diluição	Coliformes Totais (NMP.100g ⁻¹ massa seca)				E. coli (NMP.100g ⁻¹ massa seca)				Ovos de Helmintos (ovos.g ⁻¹ massa seca)			
		0h	24h	48h	1 semana	0h	24h	48h	1 semana	0h	24h	48h	1 semana
Areia Controle ¹	10 ⁻⁵	> 2419,2	>2419,2	1,9 x 10 ⁷	>2419,2	1,2 x 10 ⁷	1,4 x 10 ⁷	1,3 x 10 ⁶	7,7 x 10 ⁵	4,43	leitura inviável	1,1	0,68
Areia + Cal 10%	10 ⁻¹	-	5,6 x 10 ³	>2419,2	>2419,2	-	4,1 x 10 ²	7,4 x 10 ¹	6,1 x 10 ¹	-	0,76	0,37	0
Areia + Cal 35%	10 ⁻¹	-	4,1 x 10 ²	>2419,2	< 1	-	3,1 x 10 ²	< 1	< 1	-	0	0	0
Areia + Cal 50%	10 ⁻¹	-	<1	-	< 1	-	<1	-	< 1	-	0	0	0
Areia + Cloro T1 ²	10 ⁻⁴	-	>2419,2	>2419,2	>2419,2	-	>2419,2	8,6 x 10 ⁵	9,3 x 10 ⁴	-	2,3	1,08	0
Areia + Cloro T2 ³	10 ⁻⁴	-	>2419,2	>2419,2	>2419,2	-	>2419,2	>2419,2	1,9 x 10 ⁵	-	2,29	1,69	0,34
Areia + água sanitária	10 ⁻⁴	-	>2419,2	>2419,2	>2419,2	-	>2419,2	< 1	2,0 x 10 ³	-	4,25	1,75	2,11

> 2419,2 indica que na diluição adotada os valores extrapolaram o limite de detecção do método

< 1 indica que na diluição adotada os valores estão abaixo do limite de detecção do método

¹ Amostras que receberam apenas reviramento diário e insolação natural

² Cloro T1 - tratamento com cloro granular na proporção 5g para cada 10kg de areia

³ Cloro T2 – tratamento com cloro granular na proporção 20g para cada 10kg de areia

Fonte: YAMANE (2007).

Tabela 4.10 – Resultados dos parâmetros Coliformes Totais, *E.coli*, Ovos de Helmintos, umidade e pH dos resíduos removidos no desarenador utilizando diferentes dosagens de cal

Pilhas	Coliformes Totais (NMP 100g ⁻¹ de massa seca)		
	0h	48h	1 semana
Controle	3,6 x 10 ⁷	1,9 x 10 ⁷	1,2 x 10 ⁸
Areia + Cal 15%	-	< 1	< 1
Areia + Cal 20%	-	< 1	< 1
Areia + Cal 25%	-	< 1	< 1
Areia + Cal 30%	-	< 1	< 1
Pilhas	E. coli (NMP 100g ⁻¹ de massa seca)		
	0h	48h	1 semana
Controle	5,2 x 10 ⁶	< 1	8,5 x 10 ⁵
Areia + Cal 15%	-	< 1	< 1
Areia + Cal 20%	-	< 1	< 1
Areia + Cal 25%	-	< 1	< 1
Areia + Cal 30%	-	< 1	< 1
Pilhas	Ovos de Helmintos (ovos g ⁻¹ de massa seca)		
	0h	48h	1 semana
Areia controle	2,4	-	2,18
Areia + cal 15%	-	0	0
Areia + cal 20%	-	0	0
Areia + cal 25%	-	0	0
Areia + cal 30%	-	0	0
Pilhas	Umidade (%)		
	0h	48h	1 semana
Areia controle	16,68	10,02	8,32
Areia + cal 15%	-	10,59	8,29
Areia + cal 20%	-	14,66	11,46
Areia + cal 25%	-	15,79	11,71
Areia + cal 30%	-	23,27	13,77
Pilhas	pH		
	0h	48h	1 semana
Areia controle	7,07	6,6	6,47
Areia + cal 15%	-	11,48	11,5
Areia + cal 20%	-	11,51	11,51
Areia + cal 25%	-	11,52	11,54
Areia + cal 30%	-	11,54	11,51

Fonte: YAMANE (2007).

4.1.4. Legislação para aproveitamento da areia removida nos desarenadores de ETEs

Um dos objetivos previstos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010, regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010) é o incentivo ao desenvolvimento de sistema de gestão ambiental e empresarial voltadas para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos. De acordo com a mesma lei, a areia removida nos desarenadores de ETEs é classificada como resíduo de serviços públicos de saneamento básico, sendo o município responsável pelo seu gerenciamento.

O lodo gerado nos processos biológicos de tratamento de esgoto, também é classificado como resíduo de serviços públicos de saneamento básico e existe norma brasileira (CONAMA nº 375/2006) que define critérios e procedimentos para o uso agrícola desse resíduo. Essa mesma Resolução, em seu inciso 2º do artigo nº 3, veta a utilização agrícola dos resíduos removidos no desarenador.

A utilização da areia removida em desarenadores em ETEs na construção civil – conforme proposto na presente pesquisa – surge como uma opção, com a premissa que seja realizada sua higienização, com o objetivo de eliminar ou reduzir significativamente a densidade de micro-organismos patogênicos e remoção de matéria orgânica. Todavia, esse assunto ainda é pouco explorado, porém, promissor, pois além do potencial benefício econômico, implica em ganhos no aspecto ambiental, mediante a substituição parcial da areia comercial e diminuição da atividade de extração (i.e. empregada na construção civil) de leitos/margens de rios, que causa intenso dano à qualidade das águas e formação de erosão.

Como não existe legislação referente ao aproveitamento da areia gerada em ETEs no Brasil, nesta pesquisa tomou-se como referência a normatização de areia utilizada na construção civil e de areia de contato primário.

As areias de contato primário são aquelas utilizadas em escolas e logradouros públicos (praias, parques, praças, dentre outros), que podem se tornar veículo de transmissão de doenças quando expostas a lixo, fezes e urina de animais, secreções do corpo de crianças e adultos. A presença de micro-organismos nas areias têm sido responsável por número significativo de doenças por contato direto, como por exemplo: micoses, verminoses, gastroenterites, dentre outras, que comprometem a saúde, especialmente de crianças, que são os principais usuários de areia de contato primário (SILVA, 2005).

Como referência dos limites estabelecidos para concentração de micro-organismos presentes nas areias em escolas e logradouros públicos, tem-se utilizado os valores propostos

por pesquisadores portugueses (Tabela 4.11), no “*Guideline for Microbiological Quality of Sands*” (MENDES *et al.*, 1993).

Tabela 4.11 – Concentração máxima de micro-organismos em areia de praia usando metodologia de membrana filtrante (MF) ou tubos múltiplos

Parâmetro	Valor proposto pelo "Guideline for microbiological Quality of Sands" (NMP.100 g ⁻¹ areia seca)
Coliformes Totais	1,00E+06
Coliformes Termotolerantes	1,00E+05
Streptococos Fecais	1,00E+05
Candida sp	1,00E+05

Fonte: MENDES *et al.* (1993).

Apesar da vasta utilização da areia em várias partes da construção civil, não há normatização e legislação quanto à patogenicidade da mesma. Existe normatização que específica os requisitos exigíveis para recepção e produção dos agregados miúdos e destinados à produção de concretos de cimento Portland, como os limites do teor máximo de matéria orgânica e de composição granulométrica. Ressalta que apesar dessa norma não se aplicar a agregados obtidos por processos industriais, como subprodutos, e a materiais reciclados, ou mistura desses agregados, servirá de subsídio para comparação com material deste estudo.

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), para ensaio de impurezas orgânicas em agregado miúdo, conforme metodologia da NBR NM 49 (ABNT, 2001), a solução obtida deve ser mais clara do que a solução-padrão (300 ppm). Caso contrário, a utilização do agregado miúdo deve ser estabelecida pelo ensaio previsto na NBR 7221 (ABNT, 2012).

A distribuição granulométrica do agregado miúdo, determinada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), deve atender aos limites apresentados na Tabela 4.12. Cabe mencionar que podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto, materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas nessa tabela, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

Tabela 4.12 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
0,6 mm	15	35	55	70
0,3 mm	50	65	85	95
0,15 mm	85	90	95	100

Nota: O módulo de finura (soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100) deve atender aos seguintes limites: zona ótima de 2,20 a 2,90; zona utilizável inferior de 1,55 a 2,20; zona utilizável superior de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT (2012).

A norma NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Segundo a referida norma, o concreto de cimento Portland sem função estrutural e com agregado reciclado, refere-se ao material destinado a usos como enchimentos, contrapiso, calçadas e fabricação de artefatos não estruturais, como blocos de vedação, meio-fio (guias), sarjeta, canaletas, mourões e placas de muro. Essas utilizações, em geral, implicam no uso de concretos de classes de resistência C10 (massa específica compreendida entre 2000 kg.m^{-3} e 2800 kg.m^{-3} e resistência característica à compressão de 10 MPa) e C15 (massa específica compreendida entre 2000 kg.m^{-3} e 2800 kg.m^{-3} e resistência característica à compressão de 15 MPa) da NBR 8953 (ABNT, 2011).

4.1.5. Características do Concreto

O concreto é considerado o material mais utilizado na construção civil. Os elementos principais para a produção do concreto são: cimento, agregados e água. Em alguns casos, utilizam-se adições minerais e/ou aditivos.

O cimento e a água formam a pasta, que enche a maior parte dos espaços vazios entre os agregados. A pasta constitui o elemento ligante que junta as partículas dos agregados em uma massa sólida (ANDOLFATO, 2002).

Segundo Andolfato (2002), os agregados constituem cerca de 60% a 80% do concreto, sendo considerados inertes e devem atender às seguintes condições:

- Serem estáveis nas condições de exposição do concreto, não contendo materiais com efeitos prejudiciais;
- Apresentarem resistência à compressão e ao desgaste;
- Serem graduados, de modo a reduzir o volume da pasta, que deve encher os espaços entre os agregados.

As propriedades desejáveis do concreto fresco são aquelas que asseguram a obtenção de mistura fácil de transportar, lançar e adensar, sem que ocorra segregação de seus componentes. As principais propriedades do concreto fresco são (ALMEIDA, 2002 e ANDOLFATO, 2002):

- Consistência: é determinada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) e indica a maior ou menor fluidez da mistura fresca, relacionando-se, portanto, com a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos componentes. A relação água/cimento é o principal fator que influencia a consistência do concreto;
- Plasticidade: é a propriedade identificada pela facilidade com que o concreto é moldado sem se romper. Depende fundamentalmente da consistência e do grau de coesão entre os componentes do concreto;
- Exudação: fenômeno que ocorre em certos concretos quando a água se separa da massa e “sobe” à superfície da peça concretada. Pode ser controlada pelo proporcionamento adequado de um concreto trabalhável, evitando-se o emprego de água além do necessário. Às vezes corrige-se a exudação adicionando-se grãos relativamente finos, que compensam as deficiências dos agregados;
- Trabalhabilidade: é a propriedade do concreto fresco que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada facilidade sem perda de sua homogeneidade.

No Brasil, o ensaio de abatimento do tronco de cone é bastante utilizado, pela sua simplicidade e facilidade com que é executado na obra; é regulamentado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Basicamente consiste no preenchimento de um tronco de cone em três camadas de igual altura, sendo em cada camada dados 25 golpes com uma haste padrão. O valor do abatimento é a medida do adensamento do concreto logo após a retirada do molde cônico.

Misturas com consistência rija têm abatimento zero, de modo que não se consegue, nesses casos, observar variações de trabalhabilidade. Já, misturas ricas, como as comumente utilizadas nos concretos para a construção civil, podem ser aferidas satisfatoriamente com

esse ensaio. Neville (1997) indica correlações entre o ensaio de abatimento e trabalhabilidade (Tabela 4.13).

Tabela 4.13 – Correlação entre o ensaio de abatimento e trabalhabilidade

Trabalhabilidade	Abatimento (mm)
Abatimento zero	0
Muito baixa	5 a 10
Baixa	15 a 30
Média	15 a 75
Alta	80 a 155
Muita alta	160 ao desmoronamento

Fonte: Neville (1997).

Após fim da pega do aglomerante, obtém-se o concreto endurecido. Na sequência encontram-se as principais propriedades desse concreto.

a) Massa específica

A massa específica depende de muitos fatores, principalmente da natureza dos agregados, da sua granulometria e do método de compactação empregado. Será tanto maior quanto maior for o peso específico dos agregados usados e quanto mais quantidade de agregado gráúdo contive (ANDOLFATO, 2002).

A variação do peso específico, contudo, é pequena para o concreto convencional, sendo que NBR 6118 (ABNT, 2003) especifica que, não sendo conhecida a massa específica real, pode ser adotado o valor de 2.400 kg. m^{-3} para o concreto simples e 2.500 kg. m^{-3} para o concreto armado. A referida norma aplica-se unicamente aos concretos com massa específica entre 2.000 kg. m^{-3} e 2.800 kg. m^{-3} .

b) Resistência do concreto

De uma forma geral, a resistência do concreto pode ser definida como a última tensão aplicada ao elemento que provoca a desagregação do material que o compõe, ou ainda, como a capacidade do material de suportar ações aplicadas sem que entre em colapso (ISAIA, 2005). Pode ser afetada por diversos fatores: propriedades dos materiais, traço do concreto, grau de adensamento, condições de cura e principalmente da relação água/cimento.

A resistência mecânica do concreto é determinada através de ensaios padronizados de curta duração para possibilitar que resultados de diferentes concretos possam ser comparados.

No Brasil, adota-se a resistência obtida em corpos de prova cilíndricos, com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Em geral, os ensaios são realizados na idade padrão de 28 dias – com essa idade, o concreto já adquiriu em torno de 75 a 90% de sua resistência total.

O ensaio para determinar a resistência à compressão simples está descrito na NBR 5739 (ABNT, 2007). Em função da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), a NBR 8953 (ABNT, 2011) classifica os concretos nas classes I e II. Os concretos são designados pela letra C, que corresponde a massa específica seca compreendida entre 2000 kg.m⁻³ e 2800 kg.m⁻³, seguida do valor da resistência característica, expressa em MPa, como:

- Classe I: C10, C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50;
- Classe II: C55, C60, C70, C80.

Pode-se definir a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) como valor mínimo estatístico acima do qual ficam situados 95% dos resultados experimentais, determinada pela seguinte equação (ANDOLFATO, 2002):

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \times s \quad (EQ\ 4.1)$$

Em que:

f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos de prova ensaiados e s é o desvio padrão.

Durante décadas do século passado, foi muito comum a aplicação de concretos com resistências à compressão (f_{ck}) de 13,5 MPa, 15 MPa e 18 MPa. Na década de 90 foram comuns os concretos com f_{ck} de 20 e 25 MPa. A partir da validade da NBR 6118 (ABNT, 2003), as estruturas de Concreto Armado tiveram que ser projetadas e construídas com concreto C20 ($f_{ck} = 20$ MPa) ou superior, ficando o concreto C15 só para as estruturas de fundações e de obras provisórias. A elevação da resistência para o valor mínimo de 20 MPa objetivou aumentar a durabilidade das estruturas. Em função da agressividade do ambiente na qual a estrutura está inserida, concretos de resistências superiores ao C20 podem ser requeridos (BASTOS, 2006).

A resistência do concreto à tração é uma importante característica, porque os esforços solicitantes aplicam tensões e deformações de tração nos elementos estruturais. Esse conhecimento é particularmente importante na determinação da fissuração (momento fletor de primeira fissura e verificação da abertura das fissuras), no dimensionamento das vigas à força cortante e na resistência de aderência entre o concreto e a barra de aço.

Em função da forma como o ensaio para a determinação da resistência do concreto à tração é executado, são três os termos usados: tração direta, tração indireta e tração na flexão

(PINHEIRO, 2007). O ensaio de tração direta é difícil de ser executado, porque exige dispositivos especiais (garras metálicas) e a prensa universal, capaz de aplicar força de tração. Os ensaios de tração indireta e tração na flexão surgiram buscando contornar essas dificuldades, e os resultados servem como parâmetros para a estimativa da resistência à tração direta.

A resistência à tração indireta é determinada no ensaio de compressão diametral, prescrito na NBR 7222 (ABNT, 2011), desenvolvido por Lobo Carneiro em 1943, sendo o ensaio conhecido mundialmente por *Brazilian test* ou *splitting test*. O ensaio consiste em comprimir longitudinalmente o corpo de-prova cilíndrico (15 cm x 30 cm) segundo a direção do seu diâmetro. Quando as tensões de compressão são aplicadas no corpo de prova, ocorrem ao mesmo tempo tensões de tração perpendiculares na direção diametral, horizontais, que causam o rompimento do corpo de prova, separando-o em duas partes.

O valor da resistência à tração por compressão diametral, encontrado neste ensaio, é um pouco maior que o obtido no ensaio de tração direta e de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003) pode estimar resistência à tração direta como 90% da resistência à tração por compressão diametral. Isto pode ser explicado pelas características diferentes dos ensaios. No ensaio de tração, a superfície de ruptura é aleatória, isto é, pode ocorrer em qualquer seção. No ensaio de compressão diametral, a seção de ruptura é fixada pelas condições de ensaio, além de ocorrer perturbação junto às faces da prensa.

A resistência à tração na flexão, determinada conforme a NBR 12.142 (ABNT, 2010), consiste em submeter o corpo de prova de seção prismática à flexão, com carregamentos em duas seções simétricas. Esse ensaio, também é conhecido por “carregamento nos terços”, pelo fato das seções carregadas se encontrarem nos terços do vão (PINHEIRO, 2007).

Os valores encontrados para a resistência à tração na flexão são maiores que os encontrados nos ensaios descritos anteriormente (tração direta e compressão diametral). Isto também se explica pelas características diferentes de cada ensaio. Nos ensaios de tração e de compressão diametral, tem-se tração praticamente uniforme (PINHEIRO, 2007).

No ensaio de tração na flexão, tem-se diagrama praticamente triangular de tensões, com tensão máxima na fibra mais tracionada. Por ocasião da ruptura, ocorre plastificação, havendo solidariedade das fibras próximas daquelas mais tracionadas, aumentando o valor da tensão de ruptura (BASTOS, 2011).

A resistência característica do concreto à tração (f_{ctk}) é determinada pela seguinte equação (similar à resistência do concreto à compressão):

$$f_{ctk} = f_{cm} - 1,65 \times s \quad (EQ\ 4.2)$$

Em que:

f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos de prova ensaiados e s é o desvio padrão.

A resistência do concreto à tração varia entre 8 e 15% da resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

c) Absorção de água

A absorção de água, determinada pela NBR 9778 (ABNT, 2005), é uma das propriedades ligadas à porosidade. Em consequência da variação da porosidade do agregado utilizado, a absorção de água também apresentará variabilidade.

Alguns estudos têm observado que a absorção de água é maior para as frações de menor granulometria. Um exemplo é o estudo de Hansen e Narud (1983), que analisaram agregados de concreto reciclado da construção civil. De acordo com os resultados desse estudo (Tabela 4.14), verificou-se que a maior absorção das frações menores do agregado de concreto reciclado é devida à maior quantidade de argamassa aderida aos grãos das mesmas. Os autores concluíram que frações menores do agregado contêm materiais mais porosos e, conseqüentemente, menos resistentes. A provável causa para é que tais materiais tendem a se fragmentar mais que os materiais mais resistentes.

Tabela 4.14 – Propriedades de agregados de concreto reciclado da construção civil

Tipo de agregado	Fração granulométrica (mm)	Massa específica kg L^{-1}	Absorção de água (%)	Perda por abrasão <i>Los Angeles</i> (L500)	Volume de argamassa aderida aos grãos de rocha natural (%)
Reciclado (H)	4-8	2,34	8,5	30,1	58
	8-16	2,45	5,0	26,7	38
	16-32	2,49	3,8	22,4	35
Reciclado (M)	4-8	2,35	8,7	32,6	64
	8-16	2,44	5,4	29,2	39
	16-32	2,48	4,0	25,4	28
Reciclado (L)	4-8	2,34	8,7	41,4	61
	8-16	2,42	5,7	37,0	39
	16-32	2,49	3,7	31,5	25

Nota: H, M e L significam que os concretos britados (em britador de mandíbulas) eram de alta, média e baixa resistência, respectivamente

Fonte: Hansen e Narud (1983)

4.1.6. Características da argamassa

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define a argamassa como sendo mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalações próprias (argamassa industrializada).

De acordo com norma brasileira NBR 13529 (ABNT, 2013) é descrita a classificação das argamassas segundos vários critérios:

- Quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;
- Quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- Quanto à consistência: seca, plástica e fluida;
- Quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de cimento e de cimento e cal;
- Quanto à utilização/função do revestimento: argamassa de contra-piso, de chapisco, de emboço, de reboco; de assentamento; dentre outras;
- Quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semipronta para argamassa;
- Quanto a propriedades especiais: argamassa aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, hidrófuga e termoisolante.

Usualmente, nas obras, utilizam-se as argamassas de cal, argamassas de cimento e areia e as argamassas de cimento, cal e areia, mais conhecidas como argamassas mistas. A destinação das argamassas determina o tipo de aglomerante ou a mistura de tipos de aglomerantes.

O traço de uma argamassa é indicação das proporções dos seus componentes, utilizado para saber a qualidade da argamassa e as quantidades de consumo e apropriação de custos.

A argamassa mista utiliza o cimento, a cal, o agregado miúdo e a água. A mistura entre cimento e cal é conhecida como aglomerante. Segundo Sabbatini (1984), os ingleses utilizam de proporção 1:3 (aglomerante: areia seca) em volume como traço básico, pois partem do princípio de que com essa proporção os vazios da areia são preenchidos pela pasta aglomerante. Esta proporção é muito utilizada também no Brasil, como os tradicionais traços em volume 1:1:6 (cimento:cal:areia) para revestimentos externos e 1:2:9 para revestimentos internos. A escolha dos traços depende do desempenho esperado da argamassa ao longo do tempo, ou seja, da sua durabilidade.

Conforme mencionado anteriormente, as argamassas são classificadas de acordo com seu uso de aplicação, podendo ser utilizadas para assentamento, rejuntamento, revestimento, decorativas, dentre outros. As mais utilizadas pela construção civil são empregadas como argamassas de assentamento ou argamassas de revestimento.

A argamassa de assentamento de alvenaria é utilizada para a elevação de paredes e muros de tijolos ou blocos. De acordo com a BS 5628: Part 3 (1985) as principais funções deste tipo de argamassa são:

- Unir as unidades de alvenaria, constituir elemento monolítico, e ajudá-las a resistir aos esforços laterais;
- Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos;
- Selar as juntas garantindo a estanqueidade da parede à penetração de água das chuvas;
- Absorver as deformações naturais, como as de origem térmica e as de retração por secagem (origem higroscópica).

Para obter bom desempenho as argamassas de assentamento de alvenaria devem apresentar as seguintes características: trabalhabilidade; capacidade de retenção de água; resistência inicial; aderência adequada ao substrato; durabilidade e resistência suficiente para acomodar todas as deformações sem que ocorram fissuras (SABBATINI, 1986).

A argamassa de revestimento é utilizada para revestir paredes, muros e tetos, os quais, geralmente, recebem acabamentos como pintura, cerâmicos, laminados. As principais funções para sua aplicação são: proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo; integrar o sistema de vedação, contribuindo com diversas funções, tais como: isolamento térmico, isolamento acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais; regularizar a superfície e servir como base para acabamentos decorativos (BAUER, 2000).

Para obter bom desempenho as argamassas de revestimento devem apresentar as seguintes características: trabalhabilidade, especialmente consistência, plasticidade e adesão inicial; baixa retração; aderência; baixa permeabilidade à água; resistência mecânica, principalmente a superficial; e capacidade de absorver deformações.

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) apresenta sete requisitos para as argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, a saber:

- P: resistência à compressão (MPa) – NBR 13279 (ABNT, 2005);

- M: densidade de massa aparente no estado endurecido (kg.m^{-3}) – NBR 13280 (ABNT, 2005);
- R: resistência à tração na flexão (MPa) – NBR 13279 (ABNT, 2005);
- C: coeficiente de capilaridade ($\text{g.dm}^{-2}.\text{min}^{-1/2}$) – NBR 15259 (ABNT, 2005);
- D: densidade de massa no estado fresco (kg.m^{-3}) – NBR 13278 (ABNT, 2005);
- U: retenção de água (%) – NBR 13277 (ABNT, 2005);
- A: resistência potencial de aderência à tração (MPa) – NBR 15258 (ABNT, 2005).

Cada requisito foi subdividido em 6 classes, exceto a resistência potencial de aderência à tração, que foi subdividida em 3 classes. As argamassas são classificadas conforme as características e propriedades apresentadas na Tabela 4.15. Caso haja sobreposição entre faixas, deve ser considerado o desvio de cada ensaio e, caso o valor fique no meio de duas faixas, adota-se a maior como classificação.

Tabela 4.15 – Classificação de argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005)

Classes	P MPa	M kg.m^{-3}	R MPa	C $\text{g.dm}^{-2}.\text{min}^{-1/2}$	D kg.m^{-3}	U %	A MPa
1	$\leq 2,0$	≤ 1200	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	≤ 1400	≤ 78	$\leq 0,20$
2	1,5 a 3,0	1000 a 1400	1,0 a 2,0	1,0 a 2,5	1200 a 1600	72 a 85	$\geq 0,20$
3	2,5 a 4,5	1200 a 1600	1,5 a 2,7	2,0 a 4,0	1400 a 1800	80 a 90	$\geq 0,30$
4	4,0 a 6,5	1400 a 1800	2,0 a 3,5	3,0 a 7,0	1600 a 2000	86 a 94	-
5	5,5 a 9,0	1600 a 2000	2,7 a 4,5	5,0 a 12,0	1800 a 2200	91 a 97	-
6	$> 8,0$	> 1800	$> 3,5$	$> 10,0$	> 2000	95 a 100	-

4.1.7. Utilização de resíduos na construção civil

A construção civil é grande consumidora de agregados, sendo os maiores volumes consumidos para fabricação de concretos, em sua cadeia produtiva. O bem de maior valor agregado é o cimento; enquanto a areia e a brita, os de menor valor. Entretanto, esses são os mais representativos em volume.

As reservas de areia são relativamente abundantes em quase todas as regiões do País. No entanto, as economicamente exploráveis são altamente condicionadas a fatores humanos, tais como restrições espaciais, demográficas e de legislação. Por ser um material de reduzido valor agregado por unidade de massa, os custos de transporte representam considerável parcela do preço final do produto. Isso torna necessário reduzir ao máximo possível a

distância entre o lugar de extração e o mercado consumidor. Considera-se que, para a maior parte das regiões, as jazidas localizadas fora de um raio de 100 km do mercado consumidor, não são viáveis economicamente (LA SERNA e REZENDE, 2009).

As duas principais fontes de extração são os leitos de rio (extração por dragagem) e as várzeas (extração em cavas). A participação relativa de cada uma dessas fontes varia conforme a região.

Os impactos decorrentes da exploração de areia, muitas vezes feita de forma desordenada, causam graves problemas ambientais, pois agredem as calhas naturais dos rios, acelerando o processo de erosão das margens. A erosão acaba retirando a cobertura vegetal dessas áreas e tornando o solo estéril, sem crescimento de vegetação e sem possibilidade de recomposição do ambiente explorado (BUEST, 2006). Evidentemente, a ação da extração também provoca aumento da turbidez da água e arraste do material mais fino, que pode provocar assoreamento à jusante do local.

Com o esgotamento das jazidas de agregado miúdo natural nas proximidades dos grandes centros consumidores, o aumento dos custos de transporte, a crescente degradação ambiental devido à exploração de areia natural em leitos de rios, cavas e áreas de restinga, e, também, a conscientização da sociedade – que demanda leis de proteção ambiental – buscam-se novas alternativas para obtenção de areia.

Dentro desse contexto, uma das questões de fundamental importância é a necessidade de reaproveitar ou reciclar os resíduos gerados pelos processos produtivos, como forma de recuperar matéria e energia, visando minimizar a utilização de recursos naturais e a degradação do meio ambiente.

Atualmente, há grande preocupação em relação aos resíduos, por se tratar de problema ambiental, e também por acarretar em gastos cada vez mais elevados para transporte e disposição apropriado desse material. Dessa forma, a utilização desses resíduos para produzir outros materiais pode reduzir o consumo de energia, as distâncias de transporte, e também contribuir para a redução da poluição decorrente.

Há várias pesquisas comprovando a viabilidade técnica da reutilização de alguns resíduos gerados na construção civil, como areia de fundição, areia de britagem (produto secundário do processo de beneficiamento de pedra britada), dentre outros, como agregado na construção civil.

Outra fonte de matéria prima utilizada na construção civil são os resíduos do saneamento básico, como o lodo gerado em estações de tratamento de água e esgoto.

Pesquisas tem demonstrado a potencialidade da utilização desses resíduos na confecção de concretos ou incorporação de argamassas, em substituição parcial de algum dos seus componentes (cimento ou areia), visando redução no custo e no impacto ambiental.

Os primeiros agregados leves produzidos utilizando lodo de esgoto foram produzidos por Brosch (1975), que utilizou, primeiramente, o lodo bruto e em seguida o lodo digerido e desaguado da Estação de Tratamento Pinheiros, da cidade de São Paulo, para produzir o agregado leve. O processo utilizado foi a sinterização que consistiu nas seguintes etapas: secagem do lodo; pelotização e transformação e agregados leves através de sinterização onde os aglomerados crus são calcinados por autocombustão. A qualidade desses agregados foi considerada satisfatória quanto ao ensaio de resistência à abrasão e ao de resistência mecânica ao esmagamento.

Fontes (2003) avaliou o comportamento de argamassas e concretos devido a uma substituição parcial do cimento por cinzas do lodo de esgoto (CLE) produzido na Estação de Tratamento de Esgoto Alegria no Rio de Janeiro. O teor de substituição variou de 10% até 30%. Contatou-se que até 20% de substituição de cimento por CLE, os valores referentes ao índice de consistência foram praticamente iguais. Com relação à mistura com 30% de CLE, mesmo com a redução do índice de consistência, a mistura apresentou-se fácil de trabalhar e com moldabilidade boa. Para a resistência à compressão, os resultados indicaram que a substituição de cimento por CLE até 30%, aos 28 dias, promoveu redução de apenas 10% em relação à mistura de referência. Também, foi realizada análise ambiental, através dos ensaios de lixiviação e solubilização, a qual classificou as cinzas de lodo de esgoto como material não inerte.

Feitosa (2009) estudou a viabilidade da utilização do lodo da ETE Curado (Recife-PE) como substituto parcial da areia nas proporções de peso seco de 5%, 10% e 15% para produzir concreto. Nessa pesquisa, foram avaliados quatro traços para duas relações água/cimento ($a/c=0,57$ e $a/c=0,65$) e medidas as resistências à compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias. De acordo com os resultados (Tabela 4.16.) verificou-se que o acréscimo percentual de lodo ao concreto como agregado miúdo diminuiu a resistência à compressão, sendo o efeito mais expressivo para adição de 15% de lodo. Segundo o autor, os concretos com adição acima de 5% de lodo restringem a sua aplicação, principalmente por não apresentar propriedades mecânicas para sua utilização, sendo esta inferior a 15 MPa.

Tabela 4.16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial para idades de 7; 14 e 28 dias

Traço (cimento:areia: lodo:brita)	Relação água cimento (a/c)	Resistência à compressão (MPa)					
		Corpo de prova A			Corpo de prova B		
		7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1:1,5:0:2,5 (sem lodo)	0,57	20,06	26,67	32,57	20,02	25,06	23,12
1:2,33:0:2,85 (sem lodo)	0,65	18,5	23,5	23,5	20,11	19,51	22,62
1:1,51:0,08:2,59 (5% de lodo)	0,57	16,7	20,89	23,62	15,47	19,09	22,05
1:2,21:0,12:2,34 (5% de lodo)	0,65	15,38	16,18	16,58	13,9	16,17	13,32
1:1,32:0,15:2,59 (10% de lodo)	0,57	12,19	14,81	15,54	12,21	14,19	18,18
1:1,44:0,16:2,34 (10% de lodo)	0,65	12,26	12,01	12,17	10,09	13,2	13,21
1:0,80:0,14:2,59 (15% de lodo)	0,57	11,78	12,46	17,05	10,72	14,75	18,15
1:1,08:0,19:2,34 (15% de lodo)	0,65	10,62	11,98	12,73	10,91	11,4	12,87

Fonte: Feitosa (2009).

Chang *et al.* (2010) avaliaram o uso de lodo de esgoto, na forma de cinzas, como componente de argamassa e concreto em construção civil, junto com areia comercial e cimento. Os pesquisadores concluíram que a adição de cerca de 10% desse tipo de cinza à mistura de concreto reduz a quantidade de cimento necessária, sem perda de resistência e trabalhabilidade, tornando-se uma boa alternativa para destinação final desse tipo de resíduo.

Hoppen *et al.* (2005) avaliaram a potencialidade de utilizar lodo centrifugado da ETA Passaúna (Curitiba-PR), ainda úmido, em matrizes de concreto, substituindo-se parcialmente seus insumos. Para os estudos de dosagem, utilizou-se um concreto-referência (sem adição de lodo) e traços de concreto com teores de 3; 5; 7 e 10% de lodo em relação ao peso de areia e em substituição à mesma. A partir de então, foram avaliadas as propriedades das misturas no estado fresco e o desempenho dos concretos no estado endurecido, sendo os resultados sintetizados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Características e propriedades físicas do concreto com adição de lodo da ETE Passaúna (Curitiba-PR)

Teor de lodo (% peso de areia)	0	3	5	7	10
Traço					
Cimento	1	1	1	1	1
Areia média	2,02	1,96	1,92	1,88	1,82
Brita 1	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
Lodo de ETA		0,06	0,1	0,14	0,2
Temperatura do concreto (°C)	18,3	19	19,5	20,3	21,2
Slump (mm)	65	17	10	6	0
Massa unitária (kg.m⁻³)					
Teórica	2373	2345	2326	2307	2280
Real	2366	2319	2305	2293	2268
Ar incorporado (%)					
Teórico	0,3	1,1	0,9	0,6	0,5
Real		2	1,5	1,5	1
Compreensão axial simples (MPa)					
Resistência aos 7 dias	27,3	26,1	25,4	22,1	9,7
Resistência aos 28 dias	38,7	34	32,9	28,7	12,2
Absorção (%)					
Após imersão em água	7,14	7,76	7,8	8,62	8,94
Após imersão em fervura	7,44	7,87	9,18	9,39	9,63

Fonte: Hoppen *et al* (2005).

A partir da análise conjunta dos dados e resultados desse estudo, os autores concluíram que nas condições e parâmetros adotados, os traços de concreto contendo até 5% de lodo podem ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de artefatos, blocos e peças de concreto (como placa de estai para redes de distribuição de energia elétrica, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, e pedestais para apoio de equipamentos) até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido). Para teores acima desse, a sua utilização restringe-se a aplicações em que a trabalhabilidade não é parâmetro primordial como: contrapisos, blocos e placas de vedação, peças decorativas, calçadas e pavimentos residenciais, entre outras. Desse modo, constatou-se que a adição do lodo de ETA em matrizes de concreto é uma alternativa viável e ambientalmente correta, uma vez que promove redução de quantidades consideráveis desse material a serem dispostas em aterros ou devolvidas a cursos d'água, bem como reduções significativas no consumo de agregados naturais e, principalmente, de cimento.

Outra pesquisa, também envolvendo lodo de Estação de Tratamento de Água foi realizada por Costa (2009), que avaliou a potencialidade de utilizar o lodo gerado na ETA de Mirassol-SP como agregado miúdo na composição do concreto para reposição de calçadas.

Para confecção do concreto utilizou-se o traço (cimento:areia:brita) com a proporção de 1:2:3. A areia comercial foi substituída por lodo de ETA nas seguintes proporções: 5%, 10% e 20%. O autor concluiu que a substituição de 10% de lodo da ETA Mirassol-SP à areia comercial, não alterou as resistências e a trabalhabilidade do concreto.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Generalidades

Para avaliar a potencialidade da utilização da areia removida em desarenadores de estação de tratamento de esgoto na construção civil, inicialmente, efetuou-se a caracterização do material sedimentável removido nos desarenadores da ETE Monjolinho. A seguir, foram realizados procedimentos de limpeza e secagem desse material com intuito de reduzir a umidade, matéria orgânica e a densidade de micro-organismos patogênicos. Por fim, foram confeccionados corpos de provas com a areia produzida após procedimento de limpeza e secagem e realizados ensaios para avaliar a qualidade das argamassas e dos concretos produzidos.

4.2.2. Coleta e amostragem do material sedimentável

Para caracterização da areia residual foram coletadas seis amostras, em diferentes épocas do ano. Cada amostragem constituiu numa coleta, durante duas horas de operação dos classificadores de areia, em que cerca de 70 kg de areia era disposta sobre lona plástica, protegida de radiação solar direta e intempéries, com circulação de ar natural.

A areia disposta na lona era homogeneizada, e uma amostra de aproximadamente 2 kg era retirada (por quarteamento) para determinação dos seguintes parâmetros: série de sólidos totais, umidade, coliformes totais e fecais e analisados no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica da USP São Carlos. Em seguida, a amostra foi encaminhada à unidade experimental do tipo estufa agrícola (Figura 2.17), local onde era realizado procedimento de limpeza e secagem da mesma.

Para determinação de coliformes totais e fecais, misturavam-se durante 5 minutos, 20 gramas de areia residual com 200 ml de água deionizada. Após mistura, com agitador magnético, a amostra era mantida em repouso durante 24 horas e, depois desse tempo, o sobrenadante era analisado de acordo com o procedimento do “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005).

Também foi efetuada a determinação da distribuição granulométrica em duas amostras das seis coletadas. Para tanto, a areia residual era levada a estufa a 105 °C durante 24 horas. Após, foram realizadas determinações de sólidos totais voláteis e fixos nas frações retidas em cada abertura das peneiras do ensaio granulométrico, para verificar as porcentagens de matéria orgânica e do resíduo inerte.

4.2.3. Procedimento de limpeza e secagem da areia residual

Devido ao alto teor de material orgânico, o aproveitamento da areia em estado bruto (i.e. sem lavagem, secagem e classificação) para aplicação na construção civil é praticamente inviável. Dessa forma, foi realizado procedimento de limpeza e secagem da areia na unidade experimental, com intuito de reduzir a umidade, matéria orgânica e a densidade de micro-organismos patogênicos, tornando-a segura do ponto de vista microbiológico para as possíveis aplicações desejadas. Tal procedimento compreendeu quatro etapas.

Na primeira etapa, denominada preliminar, os resíduos coletados foram dispostos em duas baias, durante cinco dias, para a drenagem/evaporação do líquido (esgoto) que é coletado juntamente com o material. O percolato produzido foi quantificado e caracterizado.

Posteriormente, a areia bruta foi peneirada (peneira de abertura de 1,18 mm) para remoção de materiais maiores. O material retido na peneira foi quantificado (pesado).

Na sequência, efetuou-se lavagem em betoneira (capacidade de 63 litros) com água potável e hipoclorito de sódio, com concentração de 12%, visando à inativação de micro-organismos e possível oxidação da matéria orgânica agregada na areia. Para cada lavagem, foram estabelecidos os seguintes parâmetros: relação areia/água potável de 0,51, relação da solução de hipoclorito de sódio/água potável de 0,03 e tempo de mistura de 10 minutos. O resíduo produzido nessa etapa (água de lavagem) foi caracterizado.

Ressalta-se que o produto químico foi utilizado para segurança de manuseio do material que será aproveitado. Entretanto, também, foi avaliada a lavagem sem adição de produto químico.

Por fim, a areia lavada era disposta em quatro baias para secagem para depois ser encaminhada ao Laboratório de Construção Civil do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP- São Carlos, local onde foram realizados os ensaios para verificação das possibilidades de aproveitamento da mesma.

A influência do tempo de secagem no teor de umidade das amostras foi avaliada. Para tanto, antes de realizar o procedimento de limpeza e secagem da areia residual, foram coletadas amostras após cinco; 10; 15; 20 e 25 dias de secagem na estufa agrícola.

Também, avaliou-se a possibilidade de efetuar apenas a secagem da areia, sem as etapas de peneiramento e lavagem. Nestes ensaios, foram realizadas determinações de sólidos totais e coliformes totais e fecais da areia, após cinco; 10 e 15 dias de secagem na estufa agrícola; e seus resultados foram comparados com aqueles obtidos com a limpeza completa, ou seja, utilizando as etapas de peneiramento, lavagem com água potável e produto químico e secagem.

Na Figura 4.3 estão ilustradas as etapas do procedimento de limpeza e secagem da areia residual.

Figura 4.3 – Etapas do procedimento de limpeza e secagem da areia residual: (a) Preliminar; (b) peneiramento; (c) lavagem; (d) secagem.

4.2.4. Ensaios e determinações com a areia, após procedimento de limpeza e secagem

Para determinar a eficiência dos procedimentos de limpeza e secagem foram realizadas determinações de série de sólidos totais, de umidade e de coliformes totais e fecais, e seus resultados foram comparados com aqueles obtidos para areia bruta, sem lavagem e secagem. Também, foram realizadas as mesmas determinações para areia comercial de referência, com intuito de comparar os resultados.

Após procedimento de limpeza e secagem, a areia era encaminhada para o Laboratório de Construção Civil do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP- São Carlos, onde foi realizada a caracterização da mesma e avaliada a potencialidade de sua utilização como agregado para argamassa e concreto não estrutural na construção civil. Os mesmos procedimentos foram efetuados com a areia comercial comum, denominada areia de referência, proporcionando uma análise mais clara e completa para comparação de resultados.

Ressalta-se que quando se pretende fazer estudo comparativo entre dois materiais é importante que ambos possuam algumas características em comum, para então poder observar seu comportamento perante suas propriedades. Por esse motivo a areia de referência foi submetida à etapa de peneiramento (abertura de 1,18 mm), antes da realização das análises – assim como a areia retida no desarenador da ETE.

A caracterização da areia residual e de referência envolveu as seguintes análises: distribuição granulométrica, determinada segundo a NBR 248 (ABNT 2003); massa unitária e massa específica aparente, conforme a NBR 7251 (ABNT, 1982) e a NBR 9776 (ABNT, 1987), respectivamente; e determinação de impurezas orgânicas, seguindo orientações da NBR 49 (ABNT, 2001).

4.2.4.1. Ensaios do Concreto

Para ensaios de controle para o concreto, foram confeccionados corpos de provas cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) com traço 1:3:2 (cimento: areia: brita), em volume, seguindo orientações da NBR 5738 (ABNT, 1994), a qual discorre sobre os procedimentos para moldagem e cura de corpos de provas.

Para produção do concreto foram utilizados os seguintes componentes:

- Cimento Portland composto com Pozolana com resistência característica de 32 MPa (CP II-Z-32). Esse cimento tem diversas possibilidades de aplicação sendo um dos cimentos mais utilizados no Brasil. Suas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e

concreto para pavimentos. O CP II-Z-32 leva, em sua composição, de 6 a 14% de pozolana;

- Brita nº 1 com massa unitária de $1,57 \text{ kg.L}^{-1}$, diâmetro máximo (número de peneira da série normal na qual a porcentagem acumulada é inferior ou igual a 5%) de 6,30 mm e módulo de finura (soma das porcentagens acumuladas em todas as peneiras da série normal, dividida por 100) de 4,84. É bastante usado na construção civil para edificações de prédios, colunas, vigas e lajes e em usinas de concreto para fabricação do concreto convencional e bombeado;
- Como agregado miúdo, utilizam-se dois tipos: areia produzida na ETE após limpeza e secagem e a areia comercial comum (areia de referência). Ressalta-se que ambas as areias foram submetidas à etapa de peneiramento (abertura de 1,18 mm);
- Água utilizada para fabricação do concreto foi proveniente da rede de abastecimento do município de São Carlos – SAAE, sendo que sua quantidade foi variada em função de sua trabalhabilidade desejada. A relação água/cimento foi estabelecida na faixa de 0,5 a 0,7. Quanto menor o valor da relação água cimento, maior a resistência do concreto, menor sua permeabilidade e maior sua durabilidade.

Foram realizados quatro ensaios utilizando substituição total da areia comum (referência) pela areia residual. Nesses ensaios, o traço obedeceu à mesma proporção (1:3:2). O único componente que sofreu variação durante a preparação foi a água, pois sua quantidade dependeu das características da areia residual.

Para estabelecer comparações, realizou-se, também, ensaio utilizando a areia comercial comum. Nesse ensaio, o concreto foi preparado com o mesmo traço da areia residual.

Em dois ensaios realizados com a utilização de 100% da areia residual em substituição à areia comum foram analisadas as idades de 28 dias e 91 dias. Enquanto que nos outros dois, analisou-se apenas a idade de 28 dias.

Para cada idade eram moldados 12 corpos de prova, os quais foram separados da seguinte maneira: cinco eram utilizados nos ensaios de resistência à compressão axial; quatro para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, e três para determinação de absorção de água. Após realização dos ensaios descritos, um corpo de prova era escolhido aleatoriamente, o qual era moído e peneirado (peneira de 9,52 mm) para classificação do concreto de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), visando avaliar os riscos potenciais à

saúde pública e ao meio ambiente. Ressalta-se que para classificação do concreto foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização.

Também, foram realizados ensaios utilizando substituição parcial da areia comum pela areia residual nas proporções de 30%, 50%, 70% e 80%. Nesses ensaios analisou-se apenas a idade de 28 dias. Foram confeccionados oito corpos de prova para cada proporção analisada, sendo que cinco eram utilizados nos ensaios de resistência à compressão axial e três para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

O fluxograma com os ensaios com os corpos de prova confeccionados com substituição total e parcial da areia comercial comum pela areia residual é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Fluxograma dos ensaios para controle do concreto preparado com areia residual.

Antes de moldar os corpos de prova foi realizada determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), conforme orientações da NBR 67 (ABNT, 1998). Na Figura 4.5 estão ilustrados os procedimentos utilizados na preparação dos corpos de prova. Após a moldagem os corpos de prova eram cobertos com chapa metálica para reduzir as perdas de água e após 24 horas era realizado o desmolde dos mesmos.

Após desmolde, os corpos de prova eram encaminhados para câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%, onde permaneciam durante o tempo de cura (28 e 91 dias).

Ressalta-se que foi utilizado o capeamento com argamassa nas superfícies dos corpos de prova destinados aos ensaios de resistência à compressão axial, conforme recomendação da norma NBR 5738 (ABNT, 2003). Tal procedimento foi utilizado visando minimizar o efeito da excentricidade, pois as irregularidades na superfície de topo provocam distribuição não uniforme da tensão de compressão em determinados pontos, podendo interferir nos resultados de resistência.

Figura 4.5 – Preparação dos corpos de provas: (a) material utilizado; (b) mistura do material; (c) e (d) *Slump Test*; (e) corpo de prova sendo moldado na mesa vibratória; (f) corpos de provas preparados.

O equipamento utilizado nos ensaios de resistência está apresentado na Figura 4.6; e as normas utilizadas para realização dos ensaios com os corpos de provas moldados encontram-se descritos na Tabela 4.18.

Figura 4.6 – Prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão axial e à tração na compressão diametral.

Tabela 4.18 – Normas utilizadas nos ensaios com os corpos de prova

Determinação/Ensaio	Norma ABNT
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222/2011
Resistência por compressão axial	NBR 5739/2007
Absorção de água	NBR 9778/2005
Lixiviação	NBR 10.005/2004
Solubilização	NBR 10.006/2004

4.2.4.2. Ensaios Argamassa

Para ensaios de controle para argamassa, foram confeccionados corpos de provas cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) com traço 1:1:6 (cimento: cal: areia), em volume, comumente utilizado para revestimentos externos. A preparação, moldagem e cura

dos corpos de prova foram executadas de forma padronizada e seguindo o que prescreve a NBR 5738 (ABNT, 2004).

As argamassas mistas foram preparadas utilizando-se cimento, cal, areia residual e/ou areia de referência e água. O cimento utilizado foi o Portland composto com Pozolana com resistência característica de 32 MPa (CP II–Z–32). A cal empregada foi a hidratada do tipo CH-III. A relação água/cimento foi estabelecida em 1,2.

Para avaliar as possibilidades de utilização da areia residual em argamassa para revestimento externo, foram realizados ensaios utilizando substituição da areia comum pela areia residual nas porcentagens crescentes de 0%, 30%, 50% e 100%, em massa. Nesses ensaios, a idade de cura avaliada foi de 28 dias. Foram moldados cinco corpos de prova para cada proporção analisada, sendo que quatro eram utilizados nos ensaios de resistência à compressão axial e um para os ensaios de lixiviação e solubilização.

As argamassas foram preparadas utilizando-se misturador mecânico de eixo vertical com capacidade de 5 litros (argamassadeira: ver Figura 4.7a). O tempo de mistura utilizado foi de 10 minutos. Após esse tempo, os corpos prova foram moldados na mesa vibratória (Figura 4.7b).

Figura 4.7 – Ilustração da argamassadeira e mesa vibratória utilizadas nos ensaios: (a) argamassadeira e (b) mesa vibratória.

Para realização dos ensaios de lixiviação e solubilização, foi necessário peneirar (peneira de 9,52 mm) o corpo de prova triturado. Além desses ensaios, também foram realizadas análises de Coliformes Totais e *E.coli* do material triturado e peneirado.

Para determinação de coliformes totais e fecais, misturavam-se durante 5 minutos, 20 gramas da argamassa (moída e peneirada) após idade de 28 dias com 200 ml de água deionizada. Após mistura, a amostra foi mantida em repouso durante 24 horas e, depois desse tempo, o sobrenadante era analisado de acordo com o procedimento do “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005).

4.2.5. Análise econômica do aproveitamento da areia removida nos desarenadores de ETEs

As estimativas de custos são fundamentais para determinação do valor necessário à implantação das unidades para procedimento de limpeza e secagem da areia residual, visando seu aproveitamento, bem como para compará-las com os gastos da disposição da areia em aterros sanitários.

As estimativas basearam-se apenas no cenário (e capacidade da ETE Monjolinho), assim é evidente que quanto maior for o porte da ETE, mais atrativos serão os resultados.

A metodologia utilizada para avaliação do aproveitamento da areia residual baseou-se em custos unitários de insumos, de montagem, de instalação e de mão de obra, além das cotações dos equipamentos, tendo como referência as condições operacionais e porte da ETE Monjolinho (com capacidade de atendimento de 258.000 habitantes, vazão média projetada de 636 L.s^{-1}), que se aplicam a limpeza e secagem da areia em avaliação.

Nessa condição dividiu-se a estimativa de custos em três frentes principais: operação, implantação e manutenção.

A formação do “preço” de operação refere-se aos gastos utilizados no procedimento de limpeza e secagem da areia e foi composta por dois fatores: mão de obra, insumos (basicamente energia elétrica, água potável e produto químico) e transporte e disposição dos rejeitos gerados no processo para produção da areia “recuperada”.

A mão de obra é necessária para transportar a areia, após lavagem, até o pátio de secagem e realizar o espalhamento da mesma. Portanto, esse custo depende da quantidade de areia lavada, que por sua vez, depende de sua taxa e quantidade de geração. No cálculo desse fator, utilizou-se, como referência, a quantidade média de areia removida nos desarenadores da ETE Monjolinho.

As despesas com insumos também foram estimadas em função da taxa de geração da areia, considerando a potência instalada dos equipamentos, o consumo de água potável e o consumo da solução de hipoclorito de sódio para limpeza da areia.

O custo com transporte e disposição refere-se ao preço pago para transportar e dispor os rejeitos gerados na etapa de peneiramento do procedimento de limpeza e secagem. Para estimativa desse custo, utilizou-se como base o preço por tonelada pelo transporte e disposição dos resíduos gerados na ETE Monjolinho no aterro sanitário de São Carlos-SP-Brasil, dados disponibilizados pela gerência da ETE Monjolinho em maio 2014.

No custo de implantação, tomou-se como referência o preço de mercado para equipamento comercial capaz de realizar a lavagem da areia de forma automática; e investimento necessário para instalações das obras civis para secagem da areia.

No cálculo de custo de manutenção devem ser consideradas as seguintes despesas: rotinas de conservação, revisão periódica, suprimentos de peças de reposição e de substituição, dentre outros. Como é um valor difícil de ser mensurado, o custo de manutenção mensal foi adotado como sendo de 10% do valor de implantação.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Caracterização do resíduo removido nos desarenadores de ETEs

Na Tabela 4.19 encontram-se os resultados da pesagem (quantificação) dos resíduos removidos nos desarenadores no período do mês de junho de 2010 ao mês de junho de 2014. Também, apresentam-se os dados da vazão média afluyente à ETE para o referido período. Os dados da quantificação e da vazão foram fornecidos pela Gerência da ETE Monjolinho.

Cabe comentar que não foram disponibilizados os dados da quantidade de areia retida nos meses de setembro e outubro de 2010, dezembro de 2011 e no período compreendido entre fevereiro a julho de 2012. Nos meses de novembro de 2010, agosto, outubro e dezembro de 2012 ocorreram problemas operacionais na ETE, e por esse motivo, os dados das quantidades de areia foram excluídos para não afetar a representatividade da média.

Tabela 4.19 – Quantificação dos resíduos sedimentáveis removidos por mês, no desarenador

Mês/Ano	Vazão média mensal (L.s ⁻¹)	Quantidade	
		(kg)	kg.(1000 m³) ⁻¹
jun/10	570	14.200	9,6
jul/10	525	14.210	10,4
ago/10	543	13.840	9,8
dez/10	545	21.520	15,2
jan/11	460	56.660	47,5
fev/11	444	63.370	55,1
mar/11	484	52.280	41,7
abr/11	484	23.870	19,0
mai/11	452	21.070	18,0
jun/11	466	16.350	13,5
jul/11	459	10.220	8,6
ago/11	483	11.770	9,4
set/11	480	27.030	21,7
out/11	473	24.860	20,3
nov/11	492	27.790	21,8
jan/12	487	11.770	9,3
set/12	535	9.800	7,1
nov/12	535	7.050	5,1
jan/13	555	6.380	4,4
fev/13	555	3.110	2,2
mar/13	650	10.000	5,9
abr/13	650	6.070	3,6
mai/13	650	7.000	4,2
jun/13	600	10.000	6,4
jul/13	600	10.000	6,4
ago/13	600	13.000	8,4
set/13	670	9.000	5,2
out/13	670	20.000	11,5
nov/13	670	22.000	12,7
dez/13	495	25.000	19,5
jan/14	482	10.000	8,0
fev/14	471	18.000	14,7
mar/14	470	8.000	6,6
abr/14	443	20.000	17,4
mai/14	463	10.000	8,3
jun/14	452	8.000	6,8
Média	527	17.867	13,1

A partir da taxa de geração do material sedimentável removido nos desarenadores (Tabela 4.19) e com a densidade média (Tabela 4.20) foi possível estimar a relação entre volumes de resíduos e de esgoto afluente. O resultado obtido foi de $9,5 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$. Ressalta-se que esse valor foi muito inferior aos dados apresentados pelas duas ETEs em Maringá-PR (Tabela 4.3) e pela ETE Piçarrão (Campinas – SP), que obteve remoção média mensal de $42 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$ nos anos de 2007 e 2008. Entretanto, a taxa de geração de areia da ETE Monjolinho foi próxima àquelas apresentadas pelas ETEs Leopoldina e Dr Hédio Seixo Britto (Goiânia-GO), em que as médias foram de $12 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$ e $13 \text{ L} \cdot (1.000 \text{ m}^3)^{-1}$, respectivamente.

Na Tabela 4.20 estão apresentados os resultados da caracterização qualitativa dos resíduos removidos nos desarenadores.

Tabela 4.20 – Caracterização qualitativa dos resíduos removidos no desarenador da ETE Monjolinho São Carlos-SP

Parâmetro	Unidade	Média
		n=6
Coliformes Totais	UFC.(100 mL) ⁻¹	3,84E+07
E. Coli	UFC.(100 mL) ⁻¹	5,22E+05
Sólidos Totais	(%)	85,2 ± 3,60
Sólidos Totais Fixos	(%)	96,9 ± 1,07
Sólidos Totais Voláteis	(%)	3,1 ± 1,07
Porcentagem de umidade	(%)	14,8 ± 3,60

Os resíduos apresentam quantidade significativa de sólidos totais voláteis (3,1%), alto teor de umidade (14,8%) e densidade expressiva de coliformes totais [$3,84 \times 10^7 \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$] e fecais [$5,22 \times 10^6 \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$], demonstrando a necessidade de tratamento com o objetivo de eliminar ou reduzir significativamente a densidade de micro-organismos patogênicos, a fim de torná-la segura do ponto de vista microbiológico, bem como diminuir a quantidade de água e material orgânico.

Em relação aos limites propostos por pesquisadores portugueses no “Guideline for Microbiological Quality of Sand”, verificou-se que o resultado de Coliformes Totais foi superior ao limite máximo estabelecido para areia de contato primário de $1 \times 10^6 \cdot (100 \text{ g})^{-1}$. Apesar de a areia removida em ETEs não ser considerada material de contato primário, essa comparação torna-se necessário para mostrar que o manuseio desse resíduo nas condições em

que se encontram pode conferir riscos à saúde, demonstrando que seu aproveitamento está condicionado a uma higienização prévia.

Na Figura 4.8 estão apresentados os resultados da análise granulométrica dos resíduos removidos no desarenador, assim como os limites das zonas ótima e utilizável, prescritos na NBR 7211 (ABNT, 2009) para recepção e produção de agregados miúdos. Verifica-se que a granulometria do resíduo removido no desarenador encontra-se dentro da zona utilizável. O módulo de finura e o diâmetro máximo característico para o resíduo removido no desarenador foram, respectivamente, de 2,15 e 4,75 mm.

Figura 4.8 – Análise granulométrica da resíduo removido nos desarenadores e limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).

As porcentagens de sólidos totais voláteis e sólidos totais fixos e a ilustração dos tipos de materiais encontrados em cada fração retida nas peneiras dos ensaios de granulometria estão respectivamente, representadas nas Figuras 4.9 e 4.10.

Figura 4.9 – Composição das frações orgânicas e minerais retidas nas peneiras no ensaio de granulometria da areia residual antes do procedimento de limpeza e secagem.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.9, constatou-se menor concentração de resíduos orgânicos nas frações retidas nas peneiras de abertura menor, demonstrando que para possível aproveitamento desse resíduo é fundamental reduzir a parcela de matéria orgânica presente.

Figura 4.10 – Ilustração dos materiais retidos em cada fração das peneiras utilizadas na análise granulométrica.

4.3.2. Procedimento de limpeza e secagem da areia residual

Após caracterização dos resíduos, foi constatado que é inviável aproveitar a areia em estado bruto, ou seja, sem lavagem, secagem e classificação, devido ao alto teor de umidade, matéria orgânica e micro-organismos patogênicos. Para viabilizar sua utilização são necessários procedimentos capazes de reduzir esses parâmetros. Nessa pesquisa adotaram-se as etapas de peneiramento, visando redução da matéria orgânica; lavagem com água potável e produto químico, para reduzir a densidade de micro-organismos patogênicos; e a secagem para diminuir o teor de umidade.

Os resíduos coletados durante duas horas de operação dos classificadores de areia eram dispostas nas baias, da unidade experimental, para secagem preliminar. Nesta etapa ocorria drenagem/evaporação do esgoto coletado juntamente com o material. Os resultados da caracterização do líquido produzido, denominado de percolato, estão apresentados na Tabela 4.21.

Ressalta-se que do total de quatro amostras coletadas para realização do procedimento de limpeza e secagem, em uma houve falha na quantificação do percolato, e, portanto, não foi possível realizar sua caracterização.

Assim como no percolato dos resíduos dos gradeamentos, os resultados apresentados dos parâmetros analisados para o percolato do desarenador são relativamente altos; superiores aos usualmente encontradas no esgoto sanitário. Entretanto, sua produção é pequena e só acontece nos primeiros momentos após resíduos serem dispostos nas baias; durante o restante da secagem a perda de umidade acontece exclusivamente pelo processo de evaporação da água.

Na Tabela 4.22 encontram-se os resultados da etapa de peneiramento utilizada no procedimento de limpeza e secagem dos resíduos removidos nos desarenadores, e, na Figura 4.11, mediante fotografia, é apresentado o aspecto dos resíduos retidos na etapa do peneiramento.

Conforme pode ser visualizado na Figura 4.11, os materiais retidos na etapa de peneiramento são, predominantemente, pontas de cigarro, sementes, lacre de lata de alumínio, palitos de fósforo.

Tabela 4.21– Caracterização do percolado produzido durante o processo de limpeza e secagem dos resíduos removidos nos desarenadores

Parâmetro	Unidade	Média n=3	Desvio padrão
Volume	L	0,4	0,2
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	468	294
Coliformes Totais	UFC.(100 mL) ⁻¹	1,13E+09	1,60E+09
E. Coli	UFC.(100 mL) ⁻¹	3,67E+07	5,19E+07
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	717	486
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	2.451	1.434
Fosfato total	(mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	37	14
Nitrogênio amoniacal	(mg N-NH ₃ .L ⁻¹)	105	44
Nitrogênio Total kjeldhal	(mg N.L ⁻¹)	303	24
pH	-	6,7	0,3
Sólidos sedimentáveis	(mL.L ⁻¹)	52	2,1
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	3.509	676
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	1.885	227
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	1.624	820
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	1.754	730
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	895	305
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	859	440
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	1.755	87
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	991	419
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	765	393

Tabela 4.22– Resultados da etapa de peneiramento utilizada no procedimento de limpeza e secagem da areia

Parâmetro	Unidade	Média n=4	Desvio padrão
Massa da areia a ser peneirada	kg	66,68	2,47
Resíduo	kg	8,13	3,88
Relação resíduo/ areia	-	0,12	0,06

Figura 4.11 – Resíduos retidos na etapa de peneiramento do procedimento de limpeza e secagem.

A etapa de lavagem do procedimento de limpeza e secagem compreendeu a utilização de água potável com e sem adição de hipoclorito de sódio. Essa etapa visou à inativação de micro-organismos e possível oxidação de parte da matéria orgânica que não foi retida na etapa de peneiramento. A caracterização do resíduo (água de lavagem) produzido nessa etapa está representada na Tabela 4.23.

Na Figura 4.12 estão apresentados os resultados da umidade da areia residual, sem os procedimentos de limpeza (peneiramento e lavagem), ao longo do tempo de secagem na unidade experimental. Conforme dados apresentados, verificou-se elevada eficiência de remoção da umidade até o décimo quinto dia de secagem; a partir de então, a redução nos teores de umidade é pouco significativa. Por esse motivo, optou-se por tempo de secagem da areia na unidade experimental de 15 dias.

Tabela 4.23 – Caracterização dos resíduos produzidos após lavagem com água e com e sem adição da solução de hipoclorito de sódio

Parâmetro	Unidade	Sem hipoclorito de sódio	Com hipoclorito de sódio
Número de amostras		2	4
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	20,5	12,0
Coliformes Totais	UFC.(100 mL) ⁻¹	6,01E+07	Ausência
E. Coli	UFC.(100 mL) ⁻¹	3,03E+04	Ausência
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	335	259
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	892	1.661
Fosfato total	(mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	13,5	9,0
Nitrogênio amoniacal	(mg N-NH ₃ .L ⁻¹)	108,5	52,0
Nitrogênio Total kjeldhal	(mg N.L ⁻¹)	191,0	318,0
pH		5,6	4,2
Sólidos sedimentáveis	(mL.L ⁻¹)	6,0	9,0
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	2.003	5.276
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	1.324	4.141
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	679	1.136
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	1.084	1.840
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	616	1.194
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	468	646
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	920	3.436
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	708	2.947
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	212	490

Figura 4.12 – Monitoramento do teor de umidade ao longo do tempo de secagem na unidade experimental.

Após determinação do tempo de secagem, foram comparadas duas possíveis alternativas para tratamento da areia residual: limpeza e secagem, compreendendo as etapas de peneiramento, lavagem com água potável e hipoclorito de sódio e secagem; e apenas secagem. Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 estão apresentados, respectivamente, os resultados de sólidos totais voláteis, coliformes totais e coliformes fecais para a areia residual após os dois tratamentos avaliados.

Conforme os resultados apresentados nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, verificou-se que a areia residual, com procedimento de limpeza e secagem, apresentou valores de sólidos totais voláteis, coliformes totais e coliformes fecais inferiores aos da areia residual quando se utilizou apenas a secagem como tratamento.

Figura 4.13 – Teor de Sólidos Totais Voláteis da areia residual utilizando limpeza geral e apenas a secagem.

Figura 4.14 –Densidades médias de Coliformes Totais na areia residual utilizando limpeza geral e apenas a secagem.

Figura 4.15 – Densidades médias de *E.coli* na areia residual utilizando limpeza geral e apenas a secagem.

Os valores menores de sólidos totais voláteis para areia residual, após limpeza e secagem, podem ser explicados pelo fato de possuir em seu procedimento a etapa de peneiramento (peneira de 1,18 mm) precedente à secagem, em que grande parte da matéria orgânica agregada à areia residual é retida nessa etapa, devido a fato de suas frações apresentarem tamanhos superiores a 1,18 mm, conforme consta na Figura 4.9.

A areia residual submetida apenas à secagem durante 15 dias (insolação natural e reviramento diário) apresentou decaimento bacteriano médio de 1 e 3 unidades logarítmicas para coliformes totais e *E.coli*, respectivamente. Esses resultados foram semelhantes aos obtidos por YAMANE (2007), em que a areia removida em desarenadores da ETE Marcílio de Noronha (Vitória – ES), após uma semana recebendo insolação natural e reviramento diário, apresentaram eficiências de remoção de coliformes totais e *E.coli* de 1 e 2 unidades logarítmicas, respectivamente.

Os valores menores iniciais de coliformes totais e *E.coli* para areia residual submetida à limpeza e secagem, podem ser explicados pelo fato de possuir em seu procedimento a etapa de lavagem com desinfetante (hipoclorito de sódio) precedente à secagem, a qual reduziu a densidade de micro-organismos patogênicos presente na areia antes da etapa de secagem (2 unidades logarítmicas para Coliformes Totais e 3 para *E.coli*). Durante a secagem, o decaimento bacteriano médio foi de 3 e 2 unidades logarítmicas para Coliformes Totais e *E.coli*, respectivamente. No total, a eficiência de remoção de *E.coli* foi de 5 unidades logarítmicas, valor superior ao encontrado por YAMANE (2007) em seu experimento, que obteve decaimento de 4 unidades logarítmicas quando a areia removida no desarenador da ETE Marcílio de Noronha (Vitória – ES) foi submetida a água sanitária e exposta ao tempo durante uma semana.

Por fim, é importante destacar que apenas a areia submetida ao procedimento de limpeza e secagem apresentou densidade média de coliformes totais [$5,3 \times 10^2 \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$] inferior ao limite máximo estabelecido para areia de contato primário, de $10^6 \text{ NMP} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ (“*Guideline for Microbiological Quality of Sand*” – Mendes, *et al.*, 2003), demonstrado que a areia está em condições de ser transportada e manuseada sem conferir riscos à saúde humana (MENDES *et al.* 1993).

Diante do exposto, ficou comprovado que a secagem natural (insolação solar e reviramento diário) foi menos eficiente na remoção de sólidos totais voláteis, Coliformes Totais e *E.coli* do que o procedimento de limpeza e secagem, em que foram utilizadas as

etapas de peneiramento, de lavagem com água potável e hipoclorito de sódio e de secagem natural.

4.3.3. Ensaio e determinações com a areia, após procedimento de limpeza e secagem

Os resultados das determinações da areia residual removida nos desarenadores, após procedimento de limpeza e secagem e da areia de referência (areia comercial comum) estão apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Determinações da areia residual após procedimento de limpeza e secagem e da areia de referência

Parâmetro	Unidade	Areia residual Média (n=4)	Areia referência (n=1)
Coliformes Totais	UFC.(100 mL) ⁻¹	1,96E+02	1,6 x 10 ³
E. Coli	UFC.(100 mL) ⁻¹	Ausência	Ausência
Sólidos Totais	(%)	99,9 ± 0,39	99,9
Sólidos Totais Fixos	(%)	99,0 ± 0,13	99,9
Sólidos Totais Voláteis	(%)	1,0 ± 0,13	0,1
Porcentagem de umidade	(%)	0,10 ± 0,39	0,1

n= número de amostras.

Verificou-se que a areia residual após procedimento de limpeza e secagem apresentou características semelhantes à areia de referência, mostrando valores pouco superiores para os sólidos totais voláteis, *E.coli* e umidade.

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 4.20 e 4.24, constata-se que o procedimento de limpeza e secagem foi eficaz, obtendo-se aproximadamente as eficiências de remoção: 98,8% de umidade e 67,1% de sólidos totais voláteis, e, decaimento bacteriano médio de 5 e 6 unidades logarítmicas para coliformes totais e *E.coli*, respectivamente.

Na Figura 4.16 encontram-se as análises granulométricas da areia residual após limpeza e secagem e da areia de referência.

Figura 4.16 – Análise granulométrica da areia residual após procedimento de limpeza e secagem e da areia de referência.

Nota-se que as curvas granulométricas apresentaram características semelhantes. Para ambas as curvas a porcentagem acumulada foi menor que o limite inferior (5%) para abertura de 1,18 mm. A areia residual também apresentou porcentagem acumulada menor que o limite inferior (15%) para abertura de 0,60 mm. A explicação para tal fato é que foram removidos todos resíduos com dimensões maiores durante a etapa de peneiramento (peneira de 1,18 mm) tanto da areia residual quanto na areia de referência.

Ressalta-se que podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto, materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas apresentadas na Figura 4.16, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

Na Tabela 4.25 apresentam-se as características dos agregados miúdos (areia residual após limpeza e secagem e areia de referência) utilizados na confecção dos corpos de prova.

Tabela 4.25– Características dos agregados utilizados na confecção dos corpos de prova

Parâmetro	Unidade	Norma ANBT	Areia residual	Areia de referência
Massa unitária	kg.L ⁻¹	NM 45/06	1,45	1,60
Massa específica aparente	g.cm ³	NM 52/09	2,44	2,62
Diâmetro máximo	mm	NBR 248/03	1,18	1,18
Módulo de finura	-	NBR 249/03	1,57	1,67

É importante conhecer as características dos materiais utilizados na composição do concreto, pois as mesmas influenciam na resistência, durabilidade e também na dosagem do concreto. Conforme valores apresentados verificou-se que a areia residual e a areia de referência apresentaram características bastante semelhantes.

Ambas as areias apresentaram baixo módulo de finura, indicando a presença de alta porcentagem de matéria fina.

Ressalta-se que alta porcentagem de matéria fina exige aumento da água de amassamento e, conseqüentemente, de cimento, para o mesmo fator água/cimento, tornando o concreto mais dispendioso. Além do que, o material inferior a 0,076 mm pode misturar-se com o cimento criando descontinuidade na mistura e reduzindo a resistência do concreto. Por outro lado o concreto sem o material fino é pouco trabalhável, sujeito a maior permeabilidade e agentes agressivos.

Ainda, conforme a Tabela 4.25 a massa unitária e a massa específica dos agregados utilizados apresentam valores próximos dos usualmente encontrados na literatura, e, portanto, são resultados coerentes e satisfatórios, demonstrando que o material analisado pode ser utilizado como agregado miúdo na construção civil.

Na Figura 4.17 está ilustrado o resultado da determinação colorimétrica de impurezas orgânicas da areia residual após limpeza e secagem, conforme a NBR 49 (ABNT, 2001). A suspensão da areia residual apresentou-se mais escura que a suspensão padrão, indicando maior presença de matéria orgânica na areia residual.

Apesar desse ensaio ser apenas qualitativo, foi realizada a quantificação da matéria orgânica presente na areia residual mediante a determinação do teor de sólidos totais. Esse resultado foi apresentado na Tabela 4.24 e indicou que aproximadamente 1% dos sólidos são orgânicos.

Figura 4.17 – Determinação colorimétrica de impurezas orgânicas na areia residual. Suspensão da esquerda – areia residual e suspensão da direita – padrão.

4.3.4. Ensaio com corpos de provas de concreto

Na Tabela 4.26 encontram-se os resultados de resistência dos corpos de provas na compressão axial e à tração por compressão diametral, confeccionados com areia 100% residual e 100% de areia de referência com idade de ruptura de 28 e 91 dias. De acordo com os resultados, verificou-se que:

- Os corpos de prova confeccionados com areia de referência apresentaram valores de resistências características do concreto à compressão e à tração muito superiores aos fabricados com 100% de areia residual para as duas idades avaliadas;
- As resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral foram maiores com o aumento da idade de ruptura. No caso da resistência à compressão axial, o aumento médio foi aproximadamente de 2,4% para areia residual e 11,5% para de referência. Já para a resistência à tração por compressão diametral, o aumento foi de 9,4% para areia residual e de 4,9% para de referência;

- Os concretos confeccionados somente com areia residual apresentaram valores de resistência característica à compressão, inferiores aos estabelecidos na norma NBR 15116 (ABNT, 2004), a qual estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Segundo a referida norma, para essas utilizações implicam o uso de concretos com resistência característica à compressão de 10 MPa a 15 MPa.

Tabela 4.26 – Resultados dos ensaios de resistência na compressão axial e à tração na compressão diametral dos corpos de provas confeccionados com 100% de areia residual e areia de referência aos 28 e 91 dias

Parâmetro	Resistência na compressão axial (MPa)			
	Areia Residual		Areia de referência	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
	n=20	n=10	n=5	
Mínimo	6,80	7,90	19,60	21,40
Máximo	12,50	12,40	20,10	23,50
Média Aritmética	9,65	9,89	19,80	22,38
Mediana	9,10	9,40	19,80	22,60
Desvio Padrão (s)	1,40	1,52	0,19	0,81
f_{ck}	7,35	7,39	19,49	21,04
Parâmetro	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			
	Areia Residual		Areia de referência	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
	n=16	n=8	n=4	
Mínimo	0,77	0,77	1,61	1,86
Máximo	1,50	1,51	2,40	2,70
Média Aritmética	1,09	1,20	2,09	2,20
Mediana	1,05	1,22	2,17	2,11
Desvio Padrão (s)	0,16	0,22	0,29	0,31
f_{ctk}	0,82	0,84	1,61	1,68

n: número de amostras.

Os resultados da absorção de água dos corpos de prova confeccionados com areia residual e areia de referência estão apresentados na Tabela 4.27. De acordo com dados verificou-se que o concreto confeccionado com areia de referência apresentou maior absorção de água que o confeccionado com areia residual para ambas as idades analisadas.

Tabela 4.27 – Resultados dos ensaios de absorção de água dos corpos de provas confeccionados com areia residual e areia de referência aos 28 e 91 dias

Parâmetro	Areia residual		Areia de referência	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
	n=12	n=6	n=3	n=3
Absorção média (%)	6,23	4,86	7,49	6,82

A absorção de água é uma das propriedades ligadas à porosidade. Alguns estudos têm observado que a absorção de água é maior para as frações de menor granulometria, como o de Hansen e Narud (1983). Entretanto, tal constatação não foi observada na comparação das areias residual e de referência, uma vez que a areia residual apresentou frações menores do agregado (módulo de finura inferior ao da areia de referência) e sua absorção de água também foi menor.

Nas Tabelas 4.28 e 4.29 são apresentados, respectivamente, os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização aos 28 e 91 dias, dos corpos de prova confeccionados com 100% de areia residual e 100% areia de referência.

Tabela 4.28 – Resultados dos ensaios de lixiviação dos corpos de provas confeccionados com areia residual e areia de referência aos 28 dias

Parâmetro	Unidade	28 dias		91 dias		Limite máximo no lixiviado	Limite de detecção
		Areia Referência	Areia Residual	Areia Referência	Areia Residual		
INORGÂNICOS							
Arsênio	mg As.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0	0,0001
Bário	mg Ba.L ⁻¹	1,82	5,45	1,54	4,99	70,0	0,001
Cádmio	mg Cd.L ⁻¹	0,05	0,08	0,051	0,08	0,5	0,0006
Chumbo	mg Pb.L ⁻¹	0,46	0,45	0,52	0,48	1,0	0,01
Cromo total	mg Cr.L ⁻¹	0,142	0,10	0,235	1,09	5,0	0,005
Fluoretos	mg F.L ⁻¹	1,72	1,25	0,42	0,49	150,0	0,01
Mercúrio	mg Hg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,1	0,0001
Prata	mg Ag.L ⁻¹	0,029	0,029	0,047	0,0375	5,0	0,001
Selênio	mg Se.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0	0,001
pH do lixiviado	-	9,25	10,11	10,08	10,40	N.A.	0,0

Tabela 4.28 (CONTINUAÇÃO) – Resultados dos ensaios de lixiviação dos corpos de provas confeccionados com areia residual e areia de referência aos 28 dias

Parâmetro	Unidade	28 dias		91 dias		Limite máximo no lixiviado	Limite de detecção
		Areia Referência	Areia Residual	Areia Referência	Areia Residual		
PESTICIDAS							
Aldrin + Dieldrin	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,003	1,0X10 ⁻⁶
Clordano (todos os isômeros)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,02	1,0X10 ⁻⁶
DDT (todos os isômeros)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,2	1,0X10 ⁻⁶
2,4-D	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0	1,0X10 ⁻⁶
Endrin	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,06	1,0X10 ⁻⁶
Heptacloro e seu epóxido	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,003	1,0X10 ⁻⁶
Lindano	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,2	1,0X10 ⁻⁶
Metoxicloro	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0	2,0X10 ⁻⁶
Pentaclorofenol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,9	1,0X10 ⁻⁶
Toxafeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,5	1,0X10 ⁻⁶
2,4,5-T	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,2	1,0X10 ⁻⁶
2,4,5-TP	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0	1,0X10 ⁻⁶
OUTROS ORGÂNICOS							
Benzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,5	1,0X10 ⁻⁶
Benzo (a) pireno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,07	1,0X10 ⁻⁶
Cloreto de vinila	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,5	5,0X10 ⁻⁶
Clorobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	100,0	2,0X10 ⁻⁶
Clorofórmio	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	6,0	2,0X10 ⁻⁶
Cresol total	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,001
O-cresol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,001
M-cresol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,001
P-cresol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,001
1,4-Diclorobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	7,5	2,0X10 ⁻⁶
1,2-Dicloroetano	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0	2,0X10 ⁻⁶
1,1-Dicloroetileno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0	2,0X10 ⁻⁶
2,4-Dinitrotolueno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,13	2,0X10 ⁻⁶
Hexaclorobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,1	1,0X10 ⁻⁶
Hexaclorobutadieno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,5	1,0X10 ⁻⁶
Hexacloroetano	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0	1,0X10 ⁻⁶
Metietilcetona	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,01
Nitrobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0	1,0X10 ⁻⁶
Piridina	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	5,0	0,004
Tetracloroeto de carbono	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,2	2,0X10 ⁻⁶
Tetracloroetileno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	4,0	1,0X10 ⁻⁶
Tricloroetileno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	7,0	2,0X10 ⁻⁶
2,4,5-Triclorofenol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	400,0	0,01
2,4,6-Triclorofenol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	20	5,0X10 ⁻⁶

Limite máximo no extrato – anexo G (normativo) – padrões para o ensaio de solubilização (mg.L⁻¹).

LD: limite de detecção.

N.A: não se aplica.

Tabela 4.29 – Resultados dos ensaios de solubilização dos corpos de provas confeccionados com areia residual e areia de referência aos 96 dias

Parâmetro	Unidade	28 dias		91 dias		Limite máximo no extrato	Limite de detecção
		Areia Referência	Areia Residual	Areia Referência	Areia Residual		
Aldrin e Dieldrin	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0X10 ⁻⁵	1,0X10 ⁻⁶
Alumínio	mg Al.L ⁻¹	0,25	0,35	0,26	0,45	0,20	0,01
Arsênio	mg As.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,01	0,0001
Bário	mg Ba.L ⁻¹	0,79	1,96	1,24	0,86	0,70	0,001
Cádmio	mg Cd.L ⁻¹	0,004	0,054	0,017	0,042	0,005	0,0006
Chumbo	mg Pb.L ⁻¹	< LD	0,25	0,20	0,10	0,01	0,01
Cianetos	mg CN ⁻ .L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	0,001	0,07	0,001
Clordano (todos os isômeros)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0X10 ⁻⁴	1,0X10 ⁻⁶
Cloretos	mg Cl ⁻ .L ⁻¹	13,1	17,9	1,5	20,6	250	0,01
Cobre	mg Cu.L ⁻¹	0,019	0,146	0,036	0,129	2,0	0,003
Cromo total	mg Cr.L ⁻¹	0,039	< LD	0,080	0,044	0,05	0,005
2,4-D	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,03	1,0X10 ⁻⁶
DDT (todos os isômeros)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
Endrin	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	6,0X10 ⁻⁴	1,0X10 ⁻⁶
Fenóis totais	mg C ₆ H ₅ OH.L ⁻¹	0,004	< LD	0,098	< LD	0,01	0,001
Ferro total	mg Fe.L ⁻¹	0,119	0,269	0,348	0,687	0,3	0,005
Fluoretos	mg F ⁻ .L ⁻¹	0,150	0,415	< LD	0,370	1,5	0,01
Heptacloro e seu epóxido	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0X10 ⁻⁵	1,0X10 ⁻⁶
Hexaclorobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
Lindano (-BHC)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
Manganês	mg Mn.L ⁻¹	0,011	0,021	0,017	0,022	0,1	0,003
Mercúrio	mg Hg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,001	0,0001
Metoxicloro	mg.L ⁻¹	-	< LD	< LD	< LD	0,02	2,0X10 ⁻⁶
Nitratos	mg N.L ⁻¹	0,490	1,870	0,680	2,543	10,0	0,01
Prata	mg Ag.L ⁻¹	0,014	0,010	0,011	0,006	0,05	0,001
Selênio	mg Se.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,01	0,001
Sódio	mg Na.L ⁻¹	26,0	38,3	31,6	42,3	200	0,1
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ .L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	250	1,0
Surfactantes	mg LAS.L ⁻¹	0,75	0,83	0,50	0,90	0,5	0,1
Toxafeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	5,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
2,4,5-T	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
2,4,5-TP	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,03	1,0X10 ⁻⁶
Zinco	mg Zn.L ⁻¹	< LD	0,039	0,024	0,03	5,0	0,02
pH do solubilizado	—	12,24	12,33	12,24	12,23	N.A.	0,0

Limite máximo no extrato – anexo G (normativo) – padrões para o ensaio de solubilização (mg.L⁻¹).

LD: limite de detecção.

N.A.: não se aplica.

Conforme os resultados dos ensaios de lixiviação dos concretos preparados com areia residual e areia de referência aos 28 e 91 dias, verificou-se que os valores de todos os parâmetros analisados foram inferiores aos valores limites estabelecidos no extrato de lixiviado de acordo com o anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Os resultados dos ensaios de solubilização dos concretos fabricados com 100% de areia residual e 100% de areia de referência, aos 28 e 91 dias, foram muito semelhantes entre si, com alguns parâmetros pouco acima do limite máximo estabelecido pelo anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004), para ambos os corpos de provas.

Os parâmetros superiores aos valores máximos no extrato para os corpos de provas aos 28 dias foram:

- Confeccionados com areia residual: alumínio, bário, cádmio, chumbo e surfactantes;
- Confeccionados com areia de referencia: alumínio, bário e surfactantes.

Os parâmetros superiores aos valores máximos no extrato para os corpos de provas aos 91 dias foram:

- Confeccionados com areia residual: alumínio, bário, cádmio, chumbo, cromo, fenóis, ferro e surfactantes;
- Confeccionados com areia de referencia: alumínio, bário, cádmio, chumbo, ferro e surfactantes.

Diante do exposto, os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização classificaram os concretos confeccionados com areia residual e areia de referência, para ambas as idades analisadas, como resíduos classe II A, não perigosos e não inertes.

A ideia do presente estudo é de utilizar o concreto confeccionado com areia produzida na ETE para execução de serviços da própria concessionária que a gerencia, tais como: calçadas, guias, sarjetas, contra piso. Como não existe norma técnica com os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos do saneamento básico para essas utilizações (concreto não estrutural), foram adotados como referência os valores de resistência característica à compressão dispostos na norma NBR 15116 (ABNT, 2004) para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

Como os resultados dos ensaios de resistência na compressão axial dos corpos de provas confeccionados com 100% de areia residual não foram satisfatórios (inferiores aos recomendados de 10 MPa a 15 MPa), foi avaliada a substituição parcial da areia residual por areia comercial comum, visando aumentar a resistência do concreto.

Na Tabela 4.30 encontram-se os resultados dos ensaios de resistência na compressão axial e à tração por compressão diametral que utilizaram às seguintes porcentagens da areia residual 100%, 80%, 70%, 50%, 30% e 0% como agregado miúdo na preparação do concreto.

Tabela 4.30 – Resultados dos ensaios de resistência dos corpos de provas confeccionados com substituição total e parcial da areia comercial por areia residual comum aos 28 dias

Parâmetro	Resistência na compressão axial (MPa)					
	100% AR+	80% AR+	70% AR+	50% AR+	30% AR+	0% AR+
	0% AC	20% AC	30% AC	50% AC	70% AC	100% AC
	n=20			n=5		
Mínimo	6,8	10,8	12,3	13,6	17,0	19,6
Máximo	12,5	11,0	13,4	15,7	18,1	20,1
Média Aritmética	9,7	10,9	12,8	14,9	17,4	19,8
Mediana	9,1	11,0	12,8	15,2	17,1	19,8
Desvio Padrão	1,4	0,1	0,5	0,7	0,4	0,2
f_{ck}	7,3	10,8	12,0	13,7	16,7	19,5

Parâmetro	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)					
	100% AR+	80% AR+	70% AR+	50% AR+	30% AR+	0% AR+
	0% AC	20% AC	30% AC	50% AC	70% AC	100% AC
	n=16			n=3		n=4
Mínimo	0,8	1,6	1,7	1,6	1,8	1,6
Máximo	1,5	2,0	2,0	1,8	2,0	2,4
Média Aritmética	1,1	1,7	1,8	1,7	1,9	2,1
Mediana	1,1	1,6	1,7	1,8	1,8	2,2
Desvio Padrão	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
f_{ctk}	0,8	1,4	1,5	1,6	1,7	1,6

De acordo com os resultados apresentados na

Tabela 4.30, verificou-se que:

- Houve acréscimo nos valores de f_{ck} e f_{ctk} à medida que se aumentou a quantidade de areia comercial. No caso da resistência característica à compressão, os aumentos em relação aos ensaios com 100% de areia residual foram: 46,6%, 63,7%, 86,9%, 127,1% e 165,1%, respectivamente, para as seguintes porcentagens de areia comercial adicionada: 20%, 30%, 50%, 70% e 100%. Para os valores de f_{ctk} , para as mesmas proporções de areia comum adicionadas, os aumentos foram de 69,3%, 89,0%, 93,6%, 109,9% e 97,0%.
- A resistência do concreto à tração variou entre 8,2% (100% de areia comercial) e 12,8% (substituição de 20% e 30% de areia residual por comercial) da resistência à compressão;
- Os resultados de resistência do concreto preparados com a mistura da areia residual com a areia comercial comum em todas as proporções analisadas foram satisfatórios para utilizações sem função estrutural, tendo em vista que seus valores de f_{ck} foram superiores à 10 MPa (limite mínimo previsto na norma NBR 15116).

4.3.5. Ensaaios das Argamassas

Na Figura 4.18 estão apresentados os resultados das resistências à compressão axial, aos 28 dias, das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens crescentes de 0%, 30%, 50% e 100%.

Figura 4.18 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas preparadas com substituição total e parcial da areia residual por areia de comercial comum aos 28 dias.

Houve redução na resistência característica à compressão axial (f_{ck}) à medida que aumentava a substituição da areia comercial pela areia residual. As reduções em relação às argamassas sem incorporação de areia residual (100% AC +0% AR) foram de aproximadamente 6,0%, 15,9% e 19,2% para, respectivamente, as adições de 30%, 50% e 100% da areia residual.

De acordo com a NBR 13281/2005 (Tabela 4.15), todas as argamassas avaliadas foram classificadas como classe P4, pois as resistências características à compressão (f_{ck}), aos 28 dias, foram superiores a 4,0 MPa e inferiores a 6,5 MPa.

Na Figura 4.19 são apresentados os resultados das análises de Coliformes Totais e *E.coli* das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100%, após idade de 28 dias.

Figura 4.19 – Análises de Coliformes Totais e *E.coli* das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100%, após idade de 28 dias.

Conforme resultados das análises bacteriológicas, verificou-se que em todas as argamassas analisadas, com diferentes proporções de misturas de areias, apresentaram concentrações de Coliformes e *E. Coli* baixas, demonstrando que a argamassa está em condições de ser manuseada sem conferir riscos à saúde humana. Em relação aos Coliformes totais, observou-se que as densidades médias das argamassas foram inferiores ao limite máximo estabelecido para areia de contato primário de 10^6 NMP.100 g⁻¹ (MENDES *et al.*, 1993).

Nas Tabela 4.31 e 4.32 estão apresentados, respectivamente, os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100%, após idade de 28 dias.

Tabela 4.31 – Resultados dos ensaios de lixiviação das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100% aos 28 dias

Parâmetro	Unidade	100% AC+ 0% AR	70% AC+ 30% AR	50% AC+ 50% AR	0% AC+ 100% AR	Limite máximo no lixiviado	Limite de deteção
INORGÂNICOS							
Arsênio	mg As.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0	0,0001
Bário	mg B.L ⁻¹	5,21	7,96	5,95	4,24	70,0	0,001
Cádmio	mg Cd.L ⁻¹	0,115	0,103	0,108	0,095	0,5	0,0006
Chumbo	mg Pb.L ⁻¹	0,4	0,33	0,35	0,4	1,0	0,01
Cromo total	mg Cr.L ⁻¹	0,172	0,109	0,08	0,095	5,0	0,005
Fluoretos	mg F.L ⁻¹	0,37	0,26	0,42	0,33	150,0	0,01
Merúrio	mg Hg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,1	0,0001
Prata	mg Ag.L ⁻¹	0,016	0,026	0,019	0,022	5,0	0,001
Selênio	mg Se.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	0,19	1,0	0,001
pH do lixiviado		8,96	8,98	8,35	9,05	N.A.	0,0

Tabela 4.31 (CONTINUAÇÃO) – Resultados dos ensaios de lixiviação das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100% aos 28 dias

Parâmetro	Unidade	100% AC+ 0% AR	70% AC+ 30% AR	50% AC+ 50% AR	0% AC+ 100% AR	Limite máximo no lixiviado	Limite de detecção
PESTICIDAS							
Aldrin + Dieldrin	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,003	1,0X10 ⁻⁶
Clordano (todos os isômeros)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,02	1,0X10 ⁻⁶
DDT (todos os isômeros)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,2	1,0X10 ⁻⁶
2,4-D	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0	1,0X10 ⁻⁶
Endrin	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,06	1,0X10 ⁻⁶
Heptacloro e seu epóxido	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,003	1,0X10 ⁻⁶
Lindano	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,2	1,0X10 ⁻⁶
Metoxicloro	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0	2,0X10 ⁻⁶
Pentaclorofenol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,9	1,0X10 ⁻⁶
Toxafeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,5	1,0X10 ⁻⁶
2,4,5-T	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,2	1,0X10 ⁻⁶
2,4,5-TP	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0	1,0X10 ⁻⁶
OUTROS ORGÂNICOS							
Benzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,5	1,0X10 ⁻⁶
Benzo (a) pireno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,07	1,0X10 ⁻⁶
Cloreto de vinila	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,5	5,0X10 ⁻⁶
Clorobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	100,0	2,0X10 ⁻⁶
Clorofórmio	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	6,0	2,0X10 ⁻⁶
Cresol total	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,001
O-cresol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,001
M-cresol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,001
P-cresol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,001
1,4-Diclorobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	7,5	2,0X10 ⁻⁶
1,2-Dicloroetano	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0	2,0X10 ⁻⁶
1,1-Dicloroetileno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0	2,0X10 ⁻⁶
2,4-Dinitrotolueno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,13	2,0X10 ⁻⁶
Hexaclorobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,1	1,0X10 ⁻⁶
Hexaclorobutadieno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,5	1,0X10 ⁻⁶
Hexacloroetano	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0	1,0X10 ⁻⁶
Metietilcetona	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	200,0	0,01
Nitrobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0	1,0X10 ⁻⁶
Piridina	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	5,0	0,004
Tetracloreto de carbono	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,2	2,0X10 ⁻⁶
Tetracloroetileno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	4,0	1,0X10 ⁻⁶
Tricloroetileno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	7,0	2,0X10 ⁻⁶
2,4,5-Triclorofenol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	400,0	0,01
2,4,6-Triclorofenol	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	20	5,0X10 ⁻⁶

Limite máximo no extrato – anexo G (normativo) – padrões para o ensaio de solubilização (mg.L⁻¹).

LD: limite de detecção.

N.A.: não se aplica.

Tabela 4.32 – Resultados dos ensaios de solubilização das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100% aos 28 dias

Parâmetro	Unidade	100% AC+ 0% AR	70% AC+ 30% AR	50% AC+ 50% AR	0% AC+ 100% AR	Limite máximo no extrato	Limite de detecção
Aldrin e Dieldrin	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0X10 ⁻⁵	1,0X10 ⁻⁶
Alumínio	mg ALL ⁻¹	0,37	0,4	0,48	0,76	0,2	0,01
Arsênio	mg As.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,01	0,0001
Bário	mg Ba.L ⁻¹	2,22	2,59	3,89	2,19	0,7	0,001
Cádmio	mg Cd.L ⁻¹	0,017	0,015	0,021	0,018	0,005	0,0006
Chumbo	mg Pb.L ⁻¹	0,08	0,06	< LD	< LD	0,01	0,01
Cianetos	mg CN ⁻ L ⁻¹	0,041	0,076	0,118	0,108	0,07	0,001
isômeros)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0X10 ⁻⁴	1,0X10 ⁻⁶
Cloretos	mg Cl.L ⁻¹	4,8	11,6	14,2	12,2	250	0,01
Cobre	mg Cu.L ⁻¹	< LD	0,127	0,186	0,312	2,0	0,003
Cromo total	mg Cr.L ⁻¹	0,027	0,029	0,031	0,011	0,05	0,005
2,4-D	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,03	1,0X10 ⁻⁶
isômeros)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
Endrin	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	6,0X10 ⁻⁴	1,0X10 ⁻⁶
Fenóis totais	mg C ₆ H ₅ OH.L ⁻¹	0,031	0,122	0,207	0,023	0,01	0,001
Ferro total	mg Fe.L ⁻¹	0,018	0,016	0,024	0,034	0,3	0,005
Fluoretos	mg F ⁻ L ⁻¹	0,43	0,58	0,69	0,81	1,5	0,01
epóxido	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	3,0X10 ⁻⁵	1,0X10 ⁻⁶
Hexaclorobenzeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	1,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
Lindano (-BHC)	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
Manganês	mg Mn.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,1	0,003
Mercúrio	mg Hg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,001	0,0001
Metoxicloro	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,02	2,0X10 ⁻⁶
Nitratos	mg N.L ⁻¹	4,44	9,83	13,43	21,68	10,0	0,01
Prata	mg Ag.L ⁻¹	0,012	0,014	0,017	0,014	0,05	0,001
Selênio	mg Se.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,01	0,001
Sódio	mg Na.L ⁻¹	12,6	15,6	16,2	16,8	200	0,1
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ .L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	1	250	1,0
Surfactantes	mg LAS.L ⁻¹	0,5	0,5	0,75	1,25	0,5	0,1
Toxafeno	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	5,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
2,4,5-T	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	2,0X10 ⁻³	1,0X10 ⁻⁶
2,4,5-TP	mg.L ⁻¹	< LD	< LD	< LD	< LD	0,03	1,0X10 ⁻⁶
Zinco	mg Zn.L ⁻¹	0,034	0,026	0,034	0,025	5,0	0,02
pH do solubilizado	—	12,38	12,44	12,35	12,36	N.A.	0,0

Limite máximo no extrato – anexo G (normativo) – padrões para o ensaio de solubilização (mg.L⁻¹).

LD: limite de detecção.

N.A.: não se aplica.

De acordo com os resultados de lixiviação das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e

100%, aos 28 dias, verificou-se que os valores de todos os parâmetros analisados foram inferiores aos valores limites estabelecidos no extrato de lixiviado.

Os resultados dos ensaios de solubilização das argamassas preparadas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100%, aos 28 dias, foram muito semelhantes entre si (Tabela 4.33), com alguns parâmetros pouco acima do limite máximo estabelecido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Tabela 4.33 – Parâmetros superiores aos valores máximos no extrato solubilizado para as argamassas aos 28 dias

Parâmetro	Unidade	100% AC+ 0% AR	70% AC+ 30% AR	50% AC+ 50% AR	0% AC+ 100% AR	Limite máximo no extrato
Alumínio	mg Al.L ⁻¹	0,37	0,40	0,48	0,76	0,20
Bário	mg Ba.L ⁻¹	2,22	2,59	3,89	2,19	0,70
Cádmio	mg Cd.L ⁻¹	0,017	0,015	0,021	0,018	0,005
Chumbo	mg Pb.L ⁻¹	0,08	0,06	-	-	0,01
Cianetos	mg CN ⁻ .L ⁻¹	-	0,076	0,118	0,108	0,07
Fenóis totais	mg C ₆ H ₅ OH.L ⁻¹	0,031	0,122	0,207	0,023	0,010
Nitratos	mg N.L ⁻¹	-	-	13,43	21,68	10,00
Surfactantes	mg LA. L ⁻¹	-	-	0,75	1,25	0,50

Portanto, com base nos resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização podem-se classificar as argamassas com substituição da areia comercial pela areia residual nas porcentagens de 0%, 30%, 50% e 100% (28 dias) como resíduos Classe II A, não perigosos e não inertes.

4.3.6. Análise econômica do aproveitamento da areia removida nos desarenadores de ETes

Nas Tabelas 4.34 e 4.35 encontram-se, respectivamente, os custos operacionais e de implantação para aproveitamento da areia residual removidos em desarenadores de ETes. Evidentemente trata-se apenas de uma estimativa de custo preliminar e que depende do porte da ETE e condições locais. Além disso, deve ser ressaltado que trata-se de uma avaliação específica para o cenário vigente na ETE Monjolinho São Carlos-SP.

Tabela 4.34 – Custo operacional para aproveitamento da areia residual na ETE Monjolinho São Carlos-SP

Discriminação	Custo Unitário		Demanda por tonelada		Custo por demanda (R\$ t ⁻¹)
	Valor	Unidade	Valor	Unidade	
Água potável	9,69	R\$ (m ³) ⁻¹	2,16	m ³ .t ⁻¹	20,92
Solução de hipoclorito (12%)	1.020,00	R\$ (m ³) ⁻¹	0,06	m ³ .t ⁻¹	56,46
Energia	0,40	R\$ kWh ⁻¹	50,29	kWh.t ⁻¹	20,08
Mão de obra	15,00	R\$ h ⁻¹	4,00	h.t ⁻¹	59,94
Transporte e disposição do rejeito	160,00	R\$ t ⁻¹	0,10	t. t ⁻¹	16,00
Total	-	-	-	-	190,36

Data de referência: Maio 2014

Tabela 4.35 – Custo de implantação para aproveitamento da areia residual na ETE Monjolinho São Carlos-SP

Discriminação	Custo implantação (R\$)	Custo por tonelada (R\$.t ⁻¹)
Lavador de areia	90.017,04	20,00
Pátio para secagem	7.908,35	1,76
Total	97.925,39	21,76

Data de referência: Maio 2014

Nos cálculos de implantação foram consideradas as seguintes premissas:

- Equipamento disponível no mercado para lavagem de areia de uma estação do porte da ETE Monjolinho, como modelo adotou-se Coanda –Sandwaschanlage, RoSF4/ BG 1 da Huber.
- Para secagem dos resíduos adotou-se área de 4,5 m de largura e 10,0 m de comprimento e tempo necessário para secagem de 15 dias. A composição desse custo compreendeu os seguintes insumos e mão de obra para: raspagem e limpeza, mobilização de equipe, 5 cm de concreto magro, 2,0 cm de cimento desempenado, 10 m² de alvenaria, 10 m² de emboço e reboco, 45 m² de impermeabilização, material hidráulico para drenagem.
- A vida útil média das unidades (construções, material e equipamento) de 15 anos.

Além dos custos de operação e implantação, também devem ser computados as despesas referentes à manutenção, as quais foram estimadas em função do valor total de implantação.

A Tabela 4.36 mostra a estimativa total para o aproveitamento da areia removida nos desarenadores da ETE Monjolinho. Ressalta-se que para estimativa considerou-se a produção média de areia removida nos desarenadores da estação, de 25 toneladas por mês (dados disponibilizados em Maio de 2014 pela Gerência do SAAE de São Carlos).

Tabela 4.36 – Custo total para aproveitamento da areia residual na ETE Monjolinho São Carlos-SP

Discriminação	Custo por tonelada (R\$.t ⁻¹)	Custo ETE Monjolinho (R\$.mês ⁻¹)
Operação	190,36	4.759,00
Implantação	21,76	544,03
Manutenção	2,18	54,40
Total	-	5.357,43

Conforme os dados apresentados Tabela 4.36, o custo estimado para ETE Monjolinho aproveitar a areia residual removida nos desarenadores seria em torno de R\$ 5.357,43 por mês. Desse valor, deverá ser descontado o retorno financeiro que a areia trará para estação.

De acordo com os dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, o preço da areia fina, no Estado de São Paulo, é em torno de 56 R\$/m³. Com base no resultado da massa específica da areia residual de 1,45 kg.L⁻¹ (Tabela 4.25), tem-se que o preço da tonelada será de R\$ 81,20.

Na Tabela 4.37 apresenta-se comparação entre as despesas atuais com a areia removida nos desarenadores da ETE Monjolinho (disposição em aterro sanitário) e o possível custo para possível aproveitamento dessa areia.

Tabela 4.37 – Comparação entre possíveis alternativas para areia removidas na ETE Monjolinho: aproveitamento e disposição em aterros em R\$.mês⁻¹

Alternativa para areia	Custo	Benefício	Custo total final
Aproveitamento	5.357,43	1.827,00	3.530,43
Disposição em aterro sanitário	4.000,00	-	4.000,00

De acordo com resultados apresentados na Tabela 4.37, verificou-se que o aproveitamento da areia resultou em menores custos que sua disposição em aterro sanitário. Portanto, sob o ponto de vista econômico, é mais vantajoso aproveitar a areia do que dispô-la em aterros sanitários. Essa vantagem será ainda mais significativa, para ETEs de grande porte.

Além do ponto de vista técnico-econômico, há de se considerar o aspecto ambiental envolvido, visto que haverá redução na atividade de extração de areia (empregada na construção civil) de leitos/margens de rios e na disposição em aterros sanitários.

Nesse contexto, ficou comprovada a viabilidade técnica e econômica de utilização da areia residual removida nos desarenadores de ETEs.

4.4. Conclusões

Verificou-se a viabilidade da utilização da areia residual, removida nos desarenadores de ETEs, como agregado miúdo na incorporação de argamassas para revestimento e preparação de concreto não estrutural, desde que seja submetida ao procedimento de limpeza e secagem. Esse procedimento tem como o objetivo de reduzir significativamente a densidade de micro-organismos patogênicos e a remoção de matéria orgânica, uma vez que esse tipo de resíduo apresentou alto teor de umidade (17,3%), quantidade significativa de sólidos totais voláteis (3,9%) e densidades expressivas de coliformes totais [$3,42 \times 10^{-7}$ NMP.(100 ml)⁻¹] e fecais [$5,21 \times 10^{-5}$ NMP.(100 ml)⁻¹].

O procedimento de limpeza e secagem da areia residual adotado nesta pesquisa foi eficaz, uma vez que obteve as seguintes eficiências de remoção: em torno de 99,4% de umidade, 69,3% de sólidos totais voláteis e 5 log de *E. coli*. Tal procedimento envolveu a implantação de uma edificação coberta, do tipo agrícola e compreendeu etapas de peneiramento, lavagem e secagem da areia residual.

Foi comprovada a viabilidade técnica – a partir das resistências à compressão e à tração diametral – e ambiental da potencialidade de aproveitamento da mistura da areia residual com areia comercial na construção civil.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas demonstraram que, independente da proporção das areias utilizadas, todos os corpos de provas foram classificados como P4 (resistência a compressão na faixa de 4,0 a 6,5 MPa), de acordo com os requisitos da NBR 13.281 (ANBT, 2005).

Diante dos resultados de resistências obtidos e considerando a ideia de utilizar a maior proporção de material residual que seria descartado na ETE, tendo em vista que os resíduos

são um problema no gerenciamento de estações no que se refere ao manuseio, tratamento e destinação final, recomenda-se a utilização de 70% de areia residual como agregado miúdo em argamassas de cimento e cal e concreto magros (não estrutural).

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização classificaram as argamassas e os concretos confeccionados com areia residual e areia de referência como resíduos classe II A, não perigosos e não inertes. Os dados apresentados nesta pesquisa alertam para a necessidade de se promover discussão sobre os limites da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) quanto aos parâmetros vigentes de determinados elementos em matérias-primas destinadas à construção civil.

Também, constatou-se que o aproveitamento da areia residual no preparo de concretos e argamassas é uma alternativa ambientalmente correta, uma vez que promove redução de quantidades consideráveis deste material a serem dispostas em aterros ou devolvidas, bem como reduções significativas no consumo de agregados naturais.

Por fim, sob o ponto de vista econômico, constatou-se que é mais vantajoso aproveitar a areia do que dispô-la em aterros sanitários, demonstrando a viabilidade econômica do aproveitamento dos resíduos removidos nos desarenadores. Evidentemente, essa conclusão está condicionada ao porte da ETE.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

5. MATERIAL FLUTUANTE REMOVIDO NOS DESARENADORES

5.1. Revisão Bibliográfica

Este capítulo busca pelo atual estado do conhecimento sobre o problema do material flutuante removido em desarenador e/ou removedor de “óleos e graxas” de tratamento preliminar. Como esse assunto ainda é pouco explorado buscou-se proporcionar ao leitor conhecimentos mínimos ao seu entendimento, tomando como referência inicial a caracterização do material acumulado em separadores trifásicos e decantação dos reatores UASBs. Embora constitua uma comparação grosseira – pois o material flutuante não removido no tratamento preliminar é retido em UASB, quando existentes – procurou-se neste texto algumas informações básicas a respeito dessa problemática.

No que tange ao gerenciamento desse material, duas possíveis alternativas são exploradas: tratamento biológico e uso na produção de biodiesel. Dessa forma, apresenta-se incipiente entendimento sobre esse tema.

Neste capítulo, apresentam-se, também, os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, seus principais resultados e conclusões.

5.1.1. Caracterização do material flutuante removida no desarenador

A “escuma” constitui-se em subproduto gerado durante o tratamento do esgoto sanitário e, em geral, pode ser definida como camada de material flutuante composta por diferentes frações orgânicas, que se desenvolve na superfície de tanques. Junto a essa matriz residual podem estar presentes gorduras, óleos, ceras, sabões, restos de alimentos, cascas de frutas e vegetais, cabelo, papel e algodão, pontas de cigarros, materiais plásticos e materiais similares, apresentando massa específica menor que 1,0 e, geralmente, perto de 0,95 (METCALF & EDDY, 2003).

A quantidade e as características da escuma dependem da composição do esgoto afluente, notadamente do conteúdo de sólidos suspensos e de óleos e graxas (O&G), bem como da eficiência das unidades do tratamento preliminar (LOBATO *et al.*, 2007).

Os óleos e graxas presentes em esgoto sanitário são derivados de manteigas, banhas, margarinas, e gorduras de óleos vegetais, sendo também comumente encontrados em carnes, sementes de cereais e em certas frutas (METCALF & EDDY, 2003). São provenientes principalmente do preparo e manipulação de alimentos e do descarte de seus resíduos.

Visualmente, a espuma caracteriza-se por se tratar de um material tipicamente oleoso, pegajoso, com odor fétido e cor cinza. Esse material é de difícil quantificação devido a sua heterogeneidade e inexistência de metodologias específicas para sua caracterização, o que compromete a avaliação da sua composição, biodegradabilidade e respectivos coeficientes de produção, assim como a dificuldade de comparação dos resultados disponíveis na literatura. A própria constituição físico-química, as taxas de acumulação e a biodegradabilidade desse material, não são ainda bem conhecidas (HALALSHEH *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2006; VERSIANI, 2005; PEREIRA *et al.*, 2009).

Segundo Mouneimne *et al.* (2003), os resíduos gordurosos domésticos são compostos de mistura de ácidos graxos livres e das gorduras naturais formadas pela esterificação dos ácidos graxos de longa cadeia com glicerol. Estes resíduos altamente fermentáveis representam fonte potencial de poluição, pois 1 kg de tais componentes é equivalente aproximadamente a 2,4 a 2,8 kg de DQO.

Em termos qualitativos, as referências internacionais indicam concentração de substâncias oleosas e gordurosas presentes no esgoto bruto na faixa de 55 a 170 mg.L⁻¹ (METCALF & EDDY 2003). Por outro lado, alguns dados relativos às ETEs no Brasil, conforme Tabelas 5.1 e 5.2, revelam que a concentração varia de 30 a 71 mg. L⁻¹.

Tabela 5.1 – Valores de concentração de substâncias “oleosas e gordurosas” presentes em esgoto sanitário, em algumas estações de tratamento de esgoto, no Brasil

Local	Concentração (mg. L ⁻¹)
Esgoto da ETE Ipiranga, SP	45
Esgoto da ETE Penha, RJ	70
Esgoto da ETE Infraero-Apoio, RJ	60
Esgoto da ETE Infraero-TECA, RJ	30

Fonte: Jordão e Pessoa (2005).

Tabela 5.2 – Valores de concentração de substâncias “oleosas e gordurosas” presentes em esgoto sanitário das Estações de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo

Local	Concentração (mg. L ⁻¹)
ETE Suzano	36
ETE São Miguel	71
ETE Parque Novo Mundo	44
ETE Parque Barueri	58
ETE ABC	69

Fonte: SABESP (2007).

A presença dessas substâncias em grandes quantidades ocasiona problemas, tanto na rede coletora, quanto em estações de tratamento de esgoto. Segundo Canler *et al.* (2001) os principais problemas relacionados a presença de espuma são:

- Entupimento de tubulações e restrições à transferência de massa na camada de biomassa que cresce aderida ao meio suporte (biofilme), bem como acúmulo de “sujeira” nos instrumentos medidores de nível nos tanques de bombeamento;
- Odores desagradáveis relacionadas à sua alta fermentabilidade;
- O desenvolvimento de micro-organismos filamentosos, resultante do meio ambiente favorável (matéria flutuante e substrato rico em ácidos graxos) (SODDEL e SEVIOUR, 1990). Isso pode afetar a sedimentabilidade do lodo e/ou causar espuma biológica, com sérios problemas operacionais (LEMMER e BAUMANN, 1988; Duchène, 1993);
- Redução do coeficiente de transferência de oxigênio no meio;
- Diminuição do teor de matéria seca no lodo durante o desaguamento.

Pode ocorrer formação de espuma na superfície de diversas unidades de tratamento, tais como: decantadores primários, lagoas de estabilização, fossas e tanques sépticos, decantadores secundários, digestores de lodo, reatores UASB, dentre outros. Usualmente, a espuma é formada em unidades com baixa velocidade de fluxo o que indica que, não só a natureza e a presença dos constituintes da espuma são suficientes para sua formação, mas também as condições de operação.

O relato da ocorrência de problemas operacionais advindos da excessiva formação de espuma nos reatores de tratamento, principalmente no UASB, tem levado a que vários novos projetos de estações de tratamento considerem a implantação de unidades de remoção de espuma antes do tratamento biológico, como exemplo tem-se a utilização de dispositivos (raspadores) capazes de remover o material flutuante nos desarenadores aerados. Na Tabela 5.3 apresenta-se desempenho de raspadores de espuma flutuante instalados em desarenadores aerados.

Tabela 5.3 – Eficiência de remoção dos raspadores de espuma de desarenadores aerados

Parâmetro	Eficiência de remoção (%)
DQO	9
Lipídios	15 a 20

Fonte: Canler *et al.* (2001).

Nota-se que a remoção desse material é relativamente baixa. Conclui-se, portanto, que quando se deseja, realmente, obter elevada remoção desse material, deve-se projetar unidade com menor taxa de aplicação superficial do que aquelas geralmente empregados em desarenadores típicos.

Na Tabela 5.4 estão apresentadas as características da espuma removida na superfície de desarenadores de três ETEs em escala real.

Tabela 5.4 – Características da espuma removida nos desarenadores aerados de ETEs

Parâmetro	Unidade	Média	Mínima	Máxima
Demanda Química de Oxigênio	g.L ⁻¹	181	162	196
Lipídios	g.L ⁻¹	69	61	74
Nitrogênio Total kjeldhal	mg.L ⁻¹	1079	840	1260
Fósforo Total	mg.L ⁻¹	455	390	557
Sólidos Dissolvidos	g.L ⁻¹	88	74	108
Sólidos Suspensos Voláteis	g.L ⁻¹	76,5	66	88

Fonte: Canler *et al.* (2001).

Há pouca informação sobre acumulação e caracterização da espuma nas unidades de desarenação de ETEs. Entretanto, há referências na literatura técnica especializada das características físicas, químicas da espuma formada nos separadores trifásicos e decantação dos reatores UASBs (Tabela 5.5), pois tem sido foco de recentes investigações devido aos problemas operacionais associados à falta de adequado gerenciamento (frequência de descarte e correta disposição).

Apesar de poucas ETEs serem projetadas para remover óleos e graxas presentes no esgoto, é conveniente a instalação de unidades de remoção desse material visando atender aos limites estabelecidos na Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005) para lançamento de efluentes, concentração máxima permitida de 20 mg.L⁻¹ para óleos minerais e 50 mg.L⁻¹ para óleos vegetais e gorduras animais.

Tabela 5.5 – Características físico-químicas e coeficientes de acumulação de espuma em reatores UASB tratando esgoto sanitário

Ponto de acumulação da espuma	Coeficiente de acumulação da espuma	DQO (g/L)	STV (g/L)	ST (g/L)	STV/ST (%)	Referência
Decantador	4 a 8 cm.ano ⁻¹	-	-	-	-	VAN HAANDEL E LETTINGA (1994)
	50-70 cm em 3 meses	90-244	70-170	140-240	50-71	HALALSHEH et al. (2005)
	100 mld ⁻¹	15	124-784	320-1000	39-78	VERSIANI (2005)
	0,75-75,0 gST.kgDQO aplicada ⁻¹	70-180	48-112	80-150	60-74	SOUZA (2006)
	0,06-0,53 gST.kgDQO aplicada ⁻¹	64-140	14-62	30-87	47-71	PEREIRA (2007)
		83-191	44-268	25-235	32-88	PEREIRA (2012)
Separador trifásico	12,5 cm ano ⁻¹	-	-	-	-	VAN HAANDEL E LETTINGA (1994)
	35 cm em 6 meses	-	-	-	-	ROCHA (2002)
	63 cm em 4 anos	-	-	-	-	
	0,22 L.m ⁻³ de esgoto	-	-	-	-	
	0,16 L.kg DQO aplicada ⁻¹	-	-	-	-	SANTOS (2003)
	0,32 L.kg SSTaplicada ⁻¹	-	-	-	-	
	3 cm.mês ⁻¹	-	-	-	-	
	0,11-2,98 gST.kgDQO aplicada ⁻¹	2,1-9,3	0,86-8,16	1,8-25	34-59	SOUZA (2006)
	0,09-4,08 gST.kgDQO aplicada ⁻¹	16-120	23-36	33-55	15-75	PEREIRA (2007)
	21 cm mês ⁻¹	-	-	-	-	RAMOS (2008)
	0,08-2,62 gST.kgDQO aplicada ⁻¹	17-104	20-63	14-52	46-83	PEREIRA (2012)

Fonte: Adaptado de Souza (2006).

Segundo Pereira (2012), independentemente do local de acumulação nos reatores UASBs, a ausência de dispositivos devidamente projetados para a retirada da espuma, e principalmente, a falta de uma rotina operacional de remoção e disposição final, podem levar a sérios problemas, tais como:

- Perda de sólidos no efluente, carregados pela parcela de gás presente na região de decantação, quando da formação de um selo de espuma (grossa camada) e o bloqueio

da interface de liberação do biogás da fase líquida (LETTINGA & HULSHOFF POL, 1991);

- Escape do biogás para os decantadores, e a consequente perda de metano e sulfeto para atmosfera, acarretando perda de energia e aumento na geração de odores;
- Entupimentos em tubulações (de pequeno diâmetro) de remoção de espuma, quando da acumulação e enrijecimento da espuma no separador (SOUZA, 2006; CHERNICHARO *et al.*, 2009);
- Alterações (momentâneas) na qualidade do efluente, quando do desprendimento de sólidos acumulados na matriz de espuma em decantadores de reatores UASB (SOUZA, 2006);
- Danos estruturais nos separadores trifásicos, quando do acúmulo de gás sob a coifa, podendo levar muitas vezes à ruptura (RAMOS, 2008; MIKI, 2010, VAN LIER *et al.*, 2011);
- Custos adicionais de gerenciamento da espuma, como mão-de-obra, tipos de equipamentos e os métodos utilizados (RAMOS, 2008; CHERNICHARO *et al.*, 2009; MIKI, 2010).

Foi realizado levantamento de informações referentes ao gerenciamento da espuma removido nos UASBs pela Companhia de Saneamento do Estado do Paraná – Sanepar. Nesse levantamento, verificou-se que o leito de secagem, valas dentro da própria ETE e o aterro sanitário municipal são as principais formas de disposição final da espuma, conforme apresentado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Disposição final da espuma produzida nos reatores anaeróbios no Estado do Paraná

Fonte: Ross *et al.* (2013).

5.1.2. Possibilidade aproveitamento do material flutuante

5.1.2.1. Generalidades

Usualmente, o material flutuante removido nas ETEs é enviado ao aterro sanitário ou encaminhado a tanque de homogeneização de lodo, para posterior desaguamento. Entretanto, o tratamento adequado desse tipo de resíduo ou seu aproveitamento ainda foi pouco estudado, com esparsas referências na literatura.

Sabe-se, entretanto, que reatores para degradação de gordura, quando em ambiente anaeróbio, efetuam a decomposição das partículas em material solúvel, na ausência de oxigênio molecular, promovendo a transformação de compostos orgânicos complexos, como lipídios, em produtos mais simples, como metano e gás carbônico, envolvendo várias reações sequenciais.

Nesse sentido, o possível aproveitamento do material flutuante envolveria o uso do gás metano formado na degradação anaeróbia para produção de energia. Coffey (2009) cita que uma tonelada de sólidos voláteis proveniente dessa degradação é suficiente para gerar 950 m³ de biogás (dos quais 65% são metano) que possui poder calorífico de 37.300 kJ.m⁻³.

Destaca-se que ainda são raras estações de tratamento de esgoto que dispõem de unidade de remoção de óleos e graxas com aproveitamento desse material.

Por outro lado, outra opção para o aproveitamento do material flutuante removido nos desarenadores é a eventual possibilidade da produção de biodiesel (biocombustível) a partir desse resíduo, o que vem de encontro ao cenário atual de busca por fontes alternativas de energias, principalmente as renováveis.

5.1.2.2. Biodegradação do material flutuante

Conforme mencionado anteriormente, a espuma é uma camada de material flutuante composta por diferentes frações orgânicas, portanto, passível de biodegradação. Além disso, caracteriza-se por apresentar significantes níveis de gorduras, proteínas ou particulados; e, portanto, pode ser considerada como águas residuárias complexas (BATSTONE *et al.*, 2000).

A biodegradação da espuma ainda é pouco explorada. Em se pensando sobre a tecnologia de tratamento desse tipo de material, os processos biológicos possíveis são o aeróbio e o anaeróbio.

Nesse sentido, as informações de Batstone *et al.* (2000) e Vidal *et al.* (2000) são de que a tecnologia por processos anaeróbios é mais atrativa, economicamente, em comparação

com a tecnologia aeróbia para tratamento de águas residuárias complexas. Outra vantagem da degradação anaeróbica é a geração de metano no biogás produzido que pode ser reaproveitado.

Em adição, a experiência relatada por Garcia-Encina *et al.* (2004) concluiu que a biodegradabilidade anaeróbia de resíduo predominantemente gorduroso e “graxoso” é mais aplicável e eficiente do que a aeróbia.

A seguir, estão apresentadas algumas experiências da biodegradação de espuma gerada no tratamento de esgoto tanto em escala real quanto em laboratório.

Souza (2006) estudou tanto a biodegradação anaeróbia quanto a aeróbia da espuma acumulada em reatores UASBs tratando esgoto sanitário para diferentes valores de TDH. Para os ensaios aeróbios, os valores de biodegradabilidade imediata (5 dias) e de longo prazo (20 dias), atingiram valores de 40 e 60% respectivamente. Já para biodegradabilidade anaeróbia imediata e longo prazo, foram observados valores na faixa de 40 a 80%. Esses resultados demonstraram que a espuma acumulada em reatores UASBs tratando esgoto doméstico é passível de tratamento biológico aeróbio ou anaeróbio em etapas posteriores (pós-tratamento).

Os estudos realizados por Souza (2006) revelaram que a fração biodegradada aerobiamente e anaerobiamente aumentou com a redução no TDH no reator UASB (5 horas), indicando que o aumento na velocidade ascensional aumenta a fração de sólidos inertes advindos do lodo para camada de espuma.

Canler *et al.* (2001) avaliaram a biodegradabilidade aeróbia da espuma removida em desarenadores aeradas de ETE em escala real (80.000 a 150.00 habitantes). Para tanto, foram estudados três reatores aeróbios construídos pela Dégremont (Biomaster ®processo), Stereau (® processo Lipocycle) e OTV Veolia (® processo Biolix), os quais alcançaram eficiências de remoção de lipídios de cerca de 80% a 85% com carga aplicada em torno de 0,25 kg de DQO kg de SST⁻¹.d⁻¹. As características e os dados operacionais desses reatores estão apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7, respectivamente.

Tabela 5.6 – Características dos reatores aeróbios de degradação de espuma removida nos desarenadores aerados de ETEs

Parâmetro	Unidade	Reator 1	Reator 2	Reator 3
Volume	m ³	200	600	210
Carga volumétrica	kg DQO.m ⁻³ .d ⁻¹	25	25	25
Relação F/M	kg DQO.kg SSV ⁻¹ .d ⁻¹	0.22–0.33	0.21–0.31	0.25
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	kg.m ⁻³	7.8–11	8–12	10
Tempo de detenção (TDH)	d	20	15–20	12–20

Fonte: Canler *et al.* (2001).

Tabela 5.7 – Dados operacionais dos reatores aeróbios de degradação de espuma removida nos desarenadores aerados de ETEs

Parâmetro	Reator 1	Reator 2	Reator 3
Eficiência remoção de lipídios (%)	89	79	84
Temperatura (°C)	19	42	30
Quantidade de oxigênio	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória
Adição de nutrientes	Não	Sim	Sim
Carga aplicada [kg DQO _{removida} .(kg SSV) ⁻¹ .d ⁻¹]	0,05	0,30	0,31
Produção de lodo [kg SSV.(kg DQO _{removida}) ⁻¹ .d ⁻¹]	0,10	0,19	0,30
Idade do lodo (d)	> 100	17	12

Fonte: Canler *et al.* (2001).

5.1.2.3. Biodiesel

Neste item são abordados os principais temas relacionados ao trabalho desenvolvido, iniciando-se pela descrição das possíveis matérias-primas para obtenção de biodiesel, com ênfase aos óleos e gorduras residuais do saneamento. A seguir, discorre-se sobre o método de obtenção do biodiesel a partir da reação de esterificação, comumente usada em matérias primas com elevada acidez livre. Por fim, apresentam-se os principais aspectos técnicos, econômicos e ambientais da utilização de biodiesel.

a) Óleos e gorduras residuais para a Produção de Biodiesel

Recentemente, tem-se intensificado a produção de biocombustível na forma de biodiesel, para substituir parcial ou totalmente os combustíveis de origem fóssil. O biodiesel é um combustível proveniente de fontes renováveis como óleos vegetais, gorduras animais e insumos residuais que, reagem quimicamente com o álcool metílico ou etílico na presença de catalisadores.

A qualidade do biodiesel obtido apresenta relação direta com a natureza e a qualidade da matéria-prima, como também com as condições em que esta foi produzida e processada (MORETTO e FETT, 1989). As matérias-primas potenciais para a produção nacional de biodiesel podem ser subdivididas nas seguintes classes de fontes renováveis:

- Óleos vegetais: líquido à temperatura ambiente como os óleos de algodão, amendoim, babaçu, canola, dendê, girassol, mamona, soja, dentre outros;
- Gorduras animais: pastosas ou sólidas à temperatura ambiente, como exemplo tem-se sebo bovino, óleo de peixe, banha de porco, óleo de mocotó;
- Óleos e gorduras residuais: óleos residuais originários de cozinhas domésticas e industriais (óleo de fritura); gordura sobrenadante (escuma) de esgoto; óleos residuais de processamentos industriais; dentre outros.

Na Tabela 5.8 estão apresentadas as principais fontes de matérias-primas que podem ser utilizadas para obtenção do biodiesel, suas origens e formas de obtenção.

Tabela 5.8 – Matérias-primas que podem ser utilizadas para obtenção do biodiesel: origens e formas de obtenção

Categoria	Origem	Obtenção
Óleos e gorduras animais	Matadouros Frigoríficos Curtumes	Extração com vapor e água
Óleos e gorduras vegetais	Agriculturas temporárias e permanentes	Extração Mecânica Extração Solvente Extração Mista
Óleos residuais de frituras	Cocções comerciais e industriais	Acumulações e coletas
Matérias graxas do esgoto	Esgoto sanitário e alguns tipos de efluentes industriais	Processos em fase de pesquisa e desenvolvimento

Fonte: Monthé, *et al.*(2005).

Dentre as matérias-primas usadas na síntese do biodiesel, o óleo oriundo de oleaginosas (soja, o girassol, a mamona, o milho, o pinhão-manso, o caroço de algodão, a canola, o babaçu, o buriti, o dendê, o amendoim) apresenta grande destaque, entretanto, o aproveitamento dos óleos e gorduras residuais vem ganhando espaço cada vez maior, pelo fato de representarem “matérias-primas” de baixo custo, e, principalmente, porque a presença de tais resíduos é ambientalmente impactante. Contudo, ainda é necessário superar tecnologicamente as maiores limitações à sua utilização, que é a organização de sistemas eficientes de coleta e purificação (COSTA NETO *et al.*, 2000; OLIVEIRA e ROSA, 2003; OLIVEIRA, 2004; FELIZARDO *et al.*, 2006; PASQUALETTO e BARBOSA, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2008; SUAREZ *et al.*, 2009; LA ROVERE *et al.*, 2010).

Os principais componentes de óleos e gorduras residuais são os ácidos graxos que podem estar livres ou esterificados com glicerol nas formas de mono, di ou triacilglicerídeos. A presença de triacilgliceróis e ácidos graxos livre – AGL é bastante similar, constituindo, aproximadamente, em 80% de ácido palmítico, esteárico, oleico e linoleico. Dentre esses, o ácido graxo mais abundante é o ácido oleico (C18:1) (MENDES *et al.*, 2005).

Canakci e Gerpen, em 2001, estudaram a produção de biodiesel a partir de óleo residual de fritura coletado em restaurantes e verificaram que o óleo residual apresentava composição variada de ácidos graxos, no qual 40% corresponderam ao ácido oleico.

Na Tabela 5.9 encontra-se a composição média dos ácidos graxos que compõem gorduras de espuma de esgoto, removida nos decantadores primários, e em caixa de gordura trazida à estação de tratamento de esgoto por caminhões “limpa-fossa”.

Tabela 5.9 – Composição média dos ácidos graxos que compõem gorduras de caixa de gordura e espuma de esgoto na ETE Alegria – RJ

Ácido graxo	Escuma (%)	Caixa de gordura (%)
C16:0 Ácido Palmítico	72,2	19,6
C18:1 Ácido Oléico	5,8	32,3
C18:2 Ácido Linoléico	1,1	32,8
C18:0 Ácido Esteárico	12,8	6,8
C18:3 Ácido Linolênico	0,4	3,9
C14:0 Ácido Mirístico	4,8	1,3
Outros	2,9	3,3

Fonte: Pedroso *et al.* (2012).

Também podem ser encontrados fosfatídeos, que são ésteres mistos de glicerina com ácidos graxos e o ácido fosfórico. Além dos compostos ácidos graxos e seus derivados, outros em menor quantidade, como esteróis, ceras, antioxidantes, vitaminas, também estão presentes, tornando os óleos e gorduras uma mistura bastante complexa. As propriedades físico-químicas e a reatividade dessas misturas variam e em função da sua composição, o que irá definir a viabilidade técnica e econômica do seu uso como matéria-prima para a produção de um biocombustível e o uso do mesmo (SUAREZ *et al.*, 2009).

Dentre os óleos e graxas residuais utilizados como matérias-primas para a geração de biodiesel, destacam-se: o óleo residual de fritura, ácidos graxos, espuma de caixas de gordura e esgoto sanitário.

Na Tabela 5.10 estão apresentadas as médias da caracterização físico-química de quatro tipos de resíduos oleosos do saneamento ambiental: Espuma da Caixa de Gordura de uma Indústria de Alimentos (ECG-IND) do município da Grande Vitória-ES; Espuma da Caixa de Gordura do Restaurante Universitário (ECG-RU) da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES; Espuma da Caixa de Gordura da Estação de Tratamento de Efluentes (ECG-ETE) da UFES; e Lodos de Tanques e Fossas Sépticas (LTFS) presentes no campus de Goiabeiras da UFES.

Tabela 5.10 – Valores médios da caracterização físico-química dos resíduos oleosos

Parâmetros	Unidade	ECG-IND	ECG-RU	ECG-ETE	LTFS
		Número de amostras = 5			
pH	-	4,20±0,18	4,79±0,18	5,71±0,08	7,20±0,03
DQO	mg O ₂ .L ⁻¹	876.364±0,10	678.743±0,59	173.115±0,28	215.468±1,28
P-Total	mg P.L ⁻²	466±0,71	505±0,76	551±0,20	11.039±1,78
NTK	mg N.L ⁻¹	589±0,19	3.510±0,52	2.753±0,17	2.829±0,38
Óleos e graxas	mg.L ⁻¹	868.095±0,10	620.765±0,22	34.256±0,91	96.3156±0,94
Sólidos Totais	mg.L ⁻¹	877.895±0,08	666.808±0,18	119.394±0,13	210.803±0,85
Sólidos Totais Fixos	mg.L ⁻¹	1.382±0,37	27.638±1,25	237.037±0,35	147.919±1,23
Sólidos Totais Voláteis	mg.L ⁻¹	876.513±0,08	638.081±0,20	96357±0,10	6.2884±0,54
Relação SV/ST	-	0,99±0,00	0,95±0,06	0,81±0,06	0,45±0,57

Fonte: Oliveira (2012).

Usualmente os óleos e graxas residuais apresentam cor e odor desagradáveis e contém impurezas. Para minimizar este problema, é recomendada a utilização de pré-purificação e secagem antes do processo de obtenção do biodiesel. Embora a purificação desses óleos com materiais adsorventes seja possível, esse processo não é considerado viável sob o ponto de vista econômico (NETO *et al.*, 2000).

Oliveira (2012) utilizou a seguinte metodologia como pré-tratamento de óleos e graxas residuais:

“Adicionou-se em um erlenmeyer 100 g do resíduo oleoso, 1,0 mL de HCl concentrado e 100 mL de n-hexano, e com auxílio de um agitador magnético com controle de temperatura, a amostra foi mantida sob agitação e aquecimento (40°C) até sua total dissolução. Em seguida, a solução foi centrifugada para separar a fase orgânica da água e impurezas. A fase orgânica foi retirada com o auxílio de uma pipeta e transferida para um rota-evaporador a 70°C. Após verificar a total evaporação do n-hexano, coletou-se o óleo extraído e o mesmo foi submetido a filtração à vácuo seguido de centrifugação a 3.000 rpm por 5 minutos para a retirada de materiais particulados e eventuais impurezas.”

No Brasil há pesquisas e testes voltados à utilização de biodiesel a partir de óleos e gorduras residuais. Como exemplo, tem-se a instalação piloto de produção de biodiesel de éster metílico, a partir de óleo de dendê e gorduras residuais no campus da Universidade Estadual de Santa Cruz, em Ilhéus – BA. O sistema tem capacidade de produção de 1.400 L.dia⁻¹, que pode ser adaptado para a produção de éster etílico. O biodiesel produzido está sendo testado em frotas de veículos da própria Universidade e em embarcações que circulam na Baía de Camamu – BA. O projeto tem um aspecto ambiental e social muito importante, pois recolhe os óleos utilizados na cidade, em cozinhas industriais, restaurantes, dentre outros, para serem beneficiados e transformados em combustíveis (MONTHÉ *et al.*, 2005).

Na Universidade Federal do Rio de Janeiro existe unidade piloto de produção de biodiesel, baseada em óleos de frituras e cuja capacidade produtiva é de 6,5 mil L.dia⁻¹. A Hidroveg Indústrias Químicas Ltda., que fornece matéria-prima (óleos vegetais novos e usados e gordura animal), realiza a coleta dos 25 mil litros por mês de óleos de fritura usados e doados pela Rede McDonalds, trata esse insumo e fornece à UFRJ/COPPE para produção durante a etapa de testes, enquanto investe na adaptação de sua planta de beneficiamento, que produzirá 200 mil litros de biodiesel por dia e utilizará a rota metólica (MONTHÉ *et al.*, 2005).

No Canadá, Muhammad e Rohani (2011) analisaram a extração de lipídeos e a produção de biodiesel a partir de águas residuárias e obtiveram rendimentos superiores a 57%

de ésteres metílicos via catálise ácida com óleos e graxas extraídos de lodos primários de uma estação de tratamento de efluentes.

Mondala *et al.* (2009) pesquisaram o potencial de utilização dos lodos primário e secundário produzidos na estação de tratamento de esgoto sanitário de Tuscaloosa, nos Estados Unidos e obtiveram rendimento de 10% de ésteres metílicos de ácidos graxos por peso seco de lodo, utilizando o processo de transesterificação com metanol e catálise ácida com ácido sulfúrico.

Boocock *et al.* (1992) avaliando tipos de solventes para a extração de óleos e graxas provenientes de lodo de esgoto com vistas à produção de biocombustíveis, encontraram 18% de lipídeos por peso seco de lodo, dos quais 65% eram formados por ácidos graxos livres, 7% de glicerídeos e 28% de materiais não saponificáveis, demonstrando a potencialidade de utilização desse tipo de resíduo para a produção de biodiesel.

b) Reação de Esterificação para produção do Biodiesel

Os processos mais utilizados para produção de biodiesel são: a pirólise ou craqueamento térmico, a microemulsificação, esterificação e a transesterificação, sendo este último o processo mais convencional para a obtenção do biodiesel, combustível cujas propriedades físico-químicas são similares às do óleo diesel (MA e HANNA, 1999). Outro processo de obtenção de biodiesel bastante estudado é a reação de esterificação que é aplicado em matérias-primas residuais que exibem elevada acidez livre, tais como óleos de frituras e efluentes graxos (CANAKCI e GERPEN, 2001).

O processo de transesterificação consiste na reação de óleo vegetal bruto ou gorduras animais, geralmente com acidez menores ou iguais a 1% (CANAKCI E VAN GERPEN 2001), com álcool, resultando em uma mistura de ésteres (biodiesel) e glicerol. Do ponto de vista cinético, a transesterificação pode ser conduzida em processos catalisados por ácidos, enzimas ou bases fortes.

O processo de esterificação é utilizado nos casos de insumos ácidos, como esgoto sanitário, e não há formação de glicerol, mas de água, simultaneamente à formação de biodiesel. Os ésteres têm características físico-químicas muito semelhantes às do diesel, segundo experiências realizadas em diversos países (ROSA *et al.*, 2003).

Empregam-se, no processo de esterificação diversos tipos de álcoois, preferencialmente os de baixo peso molecular, sendo os mais estudados o metanol e o etanol.

Freedman e colaboradores (1986) demonstraram que a reação com o metanol é, tecnicamente, mais viável do que com etanol. O etanol pode ser utilizado desde que anidro

(com teor de água inferior a 2%), visto que a água atuaria como inibidor da reação. O uso de etanol anidro na reação, efetivamente, minimiza esse inconveniente, embora não implique em solução para o problema inerente à separação da glicerina da reação, que no caso da síntese do éster metílico, pode ser facilmente obtida por simples decantação (NETO *et al.*, 2000).

Quanto ao processo catalítico, a reação de esterificação não se aplica à catálise alcalina porque a reação preferencial do catalisador seria a de combinar-se com quaisquer ácidos graxos livres para formar sabão. O sabão formado favorece a ocorrência de emulsões de metanol e ácido graxo, desfavorecendo a reação de esterificação. Geralmente, empregam-se catalisadores sólidos ácidos ou a catálise enzimática na reação de esterificação, sendo o ácido sulfúrico o mais amplamente utilizado na reação de esterificação de ácidos graxos, pelo fato de ser um ácido de baixo custo, relativamente abundante, de alta reatividade e isento de água, fator essencial para evitar baixo rendimento do processo (OLIVEIRA, 2004 e BARCZA, 2007). A reação de esterificação está apresentada na Equação 5.1.

Camacho *et al.* (2005) estudaram o efeito de vários tipos de catalisadores homogêneos na esterificação de ácido graxo de palma, dentre eles, o ácido sulfúrico e o ácido fosfórico, verificando que o sulfúrico foi o catalisador mais eficiente no processo, pois apresentou conversões superiores, uma vez que o mesmo é anidro e o ácido fosfórico possui elevada quantidade de água na sua composição.

R representa a cadeia carbônica do ácido graxo e R' a cadeia carbônica do álcool reagente.

Fonte: Solomons & Fryhle (2002).

A reação de esterificação é reversível e o ácido catalisa tanto a reação direta (a esterificação) como a reação inversa (a hidrólise do éster). Assim, para deslocar o equilíbrio em favor dos produtos podem-se utilizar dois métodos: remoção de um dos produtos, preferencialmente a água; ou utilizar excesso de um dos reagentes, como o álcool.

Muitas variáveis podem afetar a velocidade da reação de esterificação de ácido graxo, tais como a temperatura, concentração de catalisador e a concentração dos reagentes (Ronnback *et al.*, 1997).

O trabalho de Oliveira (2012) teve como objetivo verificar a geração de biodiesel por transesterificação ácida com ácido sulfúrico (concentração de 1,5%) a partir de quatro resíduos oleosos do saneamento ambiental, a saber: Escuma da Caixa de Gordura de uma

Indústria de Alimentos (ECG-IND) de um município da Grande Vitória-ES; Escuma da Caixa de Gordura do Restaurante Universitário (ECG-RU) da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES; Escuma da Caixa de Gordura da Estação de Tratamento de Efluente (ECG-ETE) da UFES; e Lodos de Tanques e Fossas Sépticas (LTFS) presentes no campus de Goiabeiras da UFES. Neste trabalho, foram avaliadas as melhores condições de temperatura e razão molar entre resíduos oleosos e álcool. A melhor conversão (92,1%) para Escuma da Caixa de Gordura da Estação de Tratamento de Efluente (ECG-ETE) foi obtida com temperatura de 70 °C e razão molar 1:9 (óleo:álcool), conforme pode ser observado na Tabela 5.11.

Por sua vez, Lucena (2008) investigou os efeitos das variáveis: temperatura, concentração de catalisador e razão molar entre o álcool e o ácido graxo para produção do biodiesel a partir do ácido oléico. O melhor resultado experimental foi obtido à temperatura de 110°C com uma razão molar de 9:1 (álcool:óleo) e concentração de 1% de catalisador.

Tabela 5.11 – Resultados da produção de biodiesel após 4 horas de esterificação ácida dos óleos e graxas residuais, produzidos em atividades de saneamento

Ensaio	Razão Molar (RM)	Temperatura (°C)	Rendimento (%)			
			ECG-IND	ECG-RU	ECG-ETE	LTFS
1	1:3	50	79,9+ 0,01	66,1+ 0,01	84,6+ 0,02	68,6+ 0,03
2	1:3	60	85,4+ 0,01	67,6+ 0,01	85,5+ 0,02	69,9+ 0,03
3	1:3	70	86,5+ 0,01	53,1+ 0,01	88,8+ 0,02	68,6+ 0,03
4	1:6	50	88,9+ 0,01	82,3+ 0,01	86,0+ 0,02	68,2+ 0,03
5	1:6	60	91,9+ 0,01	83,2+ 0,01	88,1+ 0,02	72,1+ 0,03
6	1:6	70	89,2+ 0,01	93,8+ 0,01	87,9+ 0,02	71,7+ 0,03
7	1:6	60	92,2+ 0,01	82,9+ 0,01	91,3+ 0,02	69,9+ 0,03
8	1:6	60	93,4+ 0,01	89,8+ 0,01	90,9+ 0,02	70,5+ 0,03
9	1:9	50	92,2+ 0,01	87,2+ 0,01	89,5+ 0,02	69,2+ 0,03
10	1:9	60	91,4+ 0,01	81,9+ 0,01	91,5+ 0,02	74,9+ 0,03
11	1:9	70	88,5+ 0,01	95,3+ 0,01	92,1+ 0,02	72,1+ 0,03

Fonte: Oliveira (2012).

c) Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da utilização de Biosiesel

O biodiesel apresenta vantagens como a possibilidade real de substituir quase todos os derivados do petróleo, dentre elas destacam-se: i) é derivado de fontes renováveis, vegetais ou animais, e sua combustão não contribui para aumentos significativos dos níveis atmosféricos de CO₂, causadores do efeito estufa; ii) é biodegradável e sem toxicidade ambiental; iii) reduz os teores de SO_x, particulados e hidrocarbonetos, resultando em significativa redução dos

gases poluentes e consequentemente melhor qualidade do ar, especialmente nos grandes centros urbanos (Vieira, 2006 e Campos *et al.*, 2006); iv) teor médio de oxigênio e maior ponto de fulgor, conferindo excelentes propriedades combustíveis, e; v) adapta-se ao motor diesel sem a necessidade de modificações mecânicas (FERRARI, OLIVEIRA e SCABIO, 2005; SAAD, 2005; TORRES, CHIRINOS e SANTOS, 2006; MARQUES *et.al.*, 2008).

Com relação às desvantagens, pode-se mencionar a maior viscosidade do biodiesel em relação ao diesel mineral, o que pode causar problemas na injeção do combustível e alterações na potência dos motores. De acordo com Neto *et al.* (2000), os óleos vegetais apresentam valores de viscosidade elevados, podendo exceder até 100 vezes em relação ao diesel convencional, como no caso do óleo de mamona.

Tendo em vista tantas vantagens, o governo brasileiro tem estimulado a produção e comercialização dessa alternativa, sendo o marco principal a publicação do Decreto nº. 5.488 (BRASIL, 2005), que regulamenta a lei 11.097 (BRASIL, 2005), a qual estabelece a obrigatoriedade da adição de percentual mínimo de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao público, em qualquer parte do território nacional. Inicialmente, a proporção autorizada é 2% do diesel comum até 2008; 5% até 2013 e já é idealizado adicionar 20%, sendo que, nos Estados Unidos, os automóveis movidos com 100% de biodiesel têm apresentado rendimentos surpreendentes.

Segundo os dados disponibilizados no balanço energético nacional, disponibilizado pela Empresa de Energia de Petróleo (MME, 2010), o montante de biodiesel puro produzido em 2009, no Brasil, atingiu 1.608.053 m³ contra 1.167.128 m³ em 2008. Com isto, verificou-se aumento de 37,8% no biodiesel disponibilizado no mercado interno brasileiro. Sobre a mistura de biodiesel puro ao óleo diesel foram divulgados os seguintes resultados: entre janeiro e junho de 2008 a mistura foi de 2%, entre julho de 2008 e junho de 2009 foi de 3% e entre julho e dezembro de 2009 foi de 4%.

A partir da publicação da lei 11.097 (BRASIL, 2005), a Agência Nacional de Petróleo – ANP assumiu a atribuição de regular e fiscalizar as atividades relativas à produção, controle de qualidade, distribuição, revenda e comercialização do biodiesel e da mistura óleo diesel-biodiesel (BX).

No desempenho dessa nova função, a ANP editou normas de especificação do biodiesel e da mistura óleo diesel-biodiesel, promoveu a adaptação das normas regulatórias e realizou leilões para estimular a oferta do biocombustível para a mistura.

Apesar de todos os benefícios, a produção de biodiesel enfrenta obstáculos, o que o torna menos viável economicamente quando comparado com o diesel de petróleo (FERRARI *et al.*, 2005). Dentre os fatores que influenciam o custo de produção do biodiesel, destacam-se: i) a rota tecnológica de produção; ii) o tipo de matéria-prima (óleos vegetais e gorduras animais) e seu grau de purificação; iii) o tipo de álcool (metanol ou etanol); iv) o tipo de catalisador, dentre outros.

No Brasil, apesar de difícil obtenção de planilhas de custo de produção fidedignos, dada a diversidade de matérias-primas, estima-se que cerca de 80% do custo estão relacionados à matéria-prima processada, enquanto os outros 20% distribuem-se entre o álcool (etílico ou metílico), o catalisador (químico básico ou ácido) e os custos da administração (ANP, 2010).

Canakci e Gerpen, em 2003, estudaram avaliação econômica da produção de biodiesel de óleos residuais, constatando uma redução significativa do custo de produção, de cerca de 50% em relação ao biodiesel obtido do óleo de soja.

Oliveira (2004) apresentou dados interessantes acerca do custo de produção de biodiesel, a partir de diversas fontes, em comparação com o diesel de petróleo. O produto obtido a partir do óleo de mamona apresenta custo de R\$ 2,41 L⁻¹, a partir do óleo de fritura R\$ 0,49 L⁻¹ e espuma de ETE, sólidos flutuantes dos quais 10% é gordura, de R\$ 0,22 L⁻¹, enquanto que o diesel convencional custa cerca de R\$ 0,75 L⁻¹, destacando, desse modo, a vantagem de se utilizar o resíduo removido em estações de tratamento.

O biodiesel comercializado deverá garantir a integridade dos motores e dos sistemas de injeção de combustível, bem como não gerar problemas de qualidade para o diesel de petróleo quando misturado a esse e nem problemas relacionados à sua armazenagem e distribuição. Devido a isso, a ANP estabelece a especificação técnica para o biodiesel no Brasil, contida no Regulamento Técnico nº 3/2014 (BRASIL, 2014), conforme apresentado na Tabela 5.12.

Na Tabela 5.13 encontram-se os resultados da qualidade do biodiesel formado a partir de gordura de esgoto da ETE – Alegria-RJ. Nesse estudo foram avaliados dois tipos de gordura: a espuma formada nos decantadores primários da ETE e a proveniente de caixa de gordura de restaurantes e indústrias alimentícias, entre outras, trazida para a ETE através de caminhões “limpa fossa”. Tendo em vista que a espuma possui teores entre 5% e 10% de gordura e a caixa de gordura apresentam teores entre 30% e 80%, a produção de biodiesel a partir desse último foi priorizada. Antes da transformação da gordura em éster, realizada por

reações de esterificação e transesterificação, a matéria prima foi extraída mediante desemulsificação salina e peneiramento.

Tabela 5.12 – Características e especificação do biodiesel, segundo a ANP

Característica	Unidade	Limite	Método		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1) (2)	-	-	-
Massa específica a 20° C	kg m ⁻³	850 a 900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ² s ⁻¹	3,0 a 6,0	10441	445	EN ISO 3104
Teor de água, máx.	mg kg ⁻¹	200 (3)	-	6304	EN ISO 12937
Contaminação Total, máx.	mg kg ⁻¹	24	15995	-	EN ISO 12662 (5)
Ponto de fulgor, mín. (4)	°C	100	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín	% massa	96,5	15764	-	EN 14103 (5)
Resíduo de carbono, máx.	% massa	0,05	15586	4530	-
Cinzas sulfatadas, máx. (6)	% massa	0,02	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre total, máx.	mg kg ⁻¹	10	15867	5453	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Sódio + Potássio, máx.	mg kg ⁻¹	5	15554 15555 15553 15556	-	EN 14108 (5) EN 14109 (5) EN 14538 (5)
Cálcio + Magnésio, máx.	mg kg ⁻¹	5	15553 15556	-	EN 14538 (5)
Fósforo, máx. (7)	mg kg ⁻¹	10	15553	4951	EN 14107 (5) EN 16294 (5)
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx. (6)	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número Cetano (6)	-	Anotar	-	613 6890 (8)	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	5 a 14 (9)	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	14448	664	EN 14104 (5)
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15771 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5) EN 14106 (5)
Glicerol total, máx. (10)	% massa	0,25	15344 15908 (5) 15342 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Monoacilglicerol, máx.	% massa	0,7	15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Diailglicerol, max.	% massa	0,2	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Triailglicerol, máx.	% massa	0,2	15342 (5) 15344 15908	6584 (5)	EN 14105 (5)
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,2	15343	-	EN 14110 (5)
Índice de Iodo	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111 (5)
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín. (11)	h	6 (12)	-	-	EN 14112 (5) EN 15751 (5)

Fonte: Brasil, 2014.

Notas:

(1) Límpido e isento de impurezas, com anotação da temperatura de ensaio. Em caso de disputa, o produto só poderá ser considerado como não especificado no Aspecto, caso os parâmetros teor de água e/ou contaminação total estejam não conformes.

(2) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade no Aspecto, deverão ser realizadas as análises de teor de água e contaminação total. O produto será reprovado caso pelo menos um desses dois últimos parâmetros esteja fora de especificação.

(3) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade, será admitida variação de +50 mg/kg no limite do teor de água no biodiesel para o produtor e de +150 mg/kg para o distribuidor.

(4) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.

(5) Os métodos referenciados demandam validação para os materiais graxos não previstos no método e rota de produção etílica.

(6) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de Especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados à ANP pelo Produtor de biodiesel, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de material graxo, o Produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de materiais graxos utilizados.

(7) Em caso de disputa, deve ser utilizado o método EN 14107 como referência.

(8) O método ASTM D6890 poderá ser utilizado como método alternativo para determinação do número de cetano.

(9) Limites de acordo os estados. Para os estados não contemplados na tabela o ponto de entupimento a frio permanecerá 19°C.

(10) Poderá ser determinado pelos métodos ABNT NBR 15908, ABNT NBR 15344, ASTM D6584 ou EN14105, sendo aplicável o limite de 0,25% em massa. Para biodiesel oriundo de material graxo predominantemente láurico, deve ser utilizado método ABNT NBR 15908 ou ABNT NBR 15344, sendo aplicável o limite de 0,30% em massa.

(11) O limite estabelecido deverá ser atendido em toda a cadeia de abastecimento do combustível.

(12) A estabilidade à oxidação a 110 °C terá seu limite mínimo de 8 horas, a partir de 1º de novembro de 2014.

Tabela 5.13 – Qualidade do biodiesel produzida a partir de caixa de gordura de esgoto da ETE

Propriedades	Unidade	Biodiesel 2003	Biodiesel 2011	Limite
Índice de acidez	mg KOH g ⁻¹	0,274	0,360	0,5
Massa específica	kg m ⁻³	866,6	879,0	850-900
Viscosidade cinemática 40°C	mm ² s ⁻¹	3,920	4,779	3-6
Teor de éster	%	59,7	92,6	96,5
Resíduo de carbono	-	0,020	0,006	0,050
Contaminação total	mg kg ⁻¹	67,0	21,7	24,0
Monoglicerídeos	%	0,16	ND	0,8
Diglicerídeos	%	0,02	ND	0,2
Triglicerídeos	%	<0,01	ND	0,2

Fonte: Pedroso *et al.* (2012)

5.2. Material e Métodos

5.2.1. Generalidades

A coleta de amostras do material flutuante removido no tratamento preliminar foi realizada na calha de coleta desse material, localizada no final da unidade de desarenação. Inicialmente, caracterizaram-se os resíduos gordurosos, mediante ensaios apresentados na Tabela 5.14, baseados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), a saber: alcalinidade DBO, DQO, fosfato, óleos e graxas, pH, e série de sólidos. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Saneamento da EESC-USP.

Tabela 5.14 –Caracterização do material flutuante: variáveis e métodos de análises

Variável	Unidade	Método	Protocolo APHA (2005)
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	Titulométrico	2320 (B)
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	Oxímetro	5210 (B) e 4500 O (G)
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	Colorimétrico por refluxo fechado	5220 (D)
Fosfato	(mg P-PO ₄ ⁻³ .L ⁻¹)	Colorimétrico	4500 (P, E)
Óleos e graxas	(mg L ⁻¹)	Gravimétrico	5520 (B)
pH	-	Potenciométrico	4500 H ⁺
Sólidos -Série Completa	(mg .L ⁻¹)	Gravimétrico	2540 (B, D e E)

Ao todo foram coletadas 15 amostras, em duas dessas foi avaliado o aproveitamento do material solúvel em hexano como insumo para produção de biocombustível, na forma de biodiesel.

Também, avaliou-se a degradação aeróbia e anaeróbia do material flutuante removido nos desarenadores aerados da ETE Monjolinho.

5.2.2. Aproveitamento do material flutuante para produção de biodiesel

Para avaliar a potencialidade de produção de biodiesel a partir do material flutuante foi adotado o método mais comum para produção desse tipo de combustível com elevado teor de ácidos graxos, mediante reação de esterificação, utilizando álcoois e catalisador.

Antecedendo a produção de biodiesel, foi necessária a realização de pré-tratamento da amostra coletada, uma vez que a mesma apresenta quantidades elevadas de impurezas e de umidade. O pré-tratamento da matéria prima visou à “otimização” da reação de esterificação e compreendeu as etapas de peneiramento e extração de óleos e graxas.

O material flutuante foi peneirado mediante utilização de uma tela “mosquiteiro” em fibra de vidro revestida em PVC (fio de 0,25 mm e malha 6x6) para retirada de possíveis resíduos grosseiros.

Posteriormente, foi realizada a extração dos óleos e graxas em laboratório. Para tanto, adicionou-se em erlenmeyer 100 g do resíduo oleoso, 1,0 mL de ácido clorídrico concentrado e 100 mL de n-hexano. A solução foi mantida sob agitação e aquecimento (40°C) até sua total dissolução, com auxílio de agitador magnético com controle de temperatura. Em seguida, foi centrifugada a 5.000 rpm por 5 minutos para separar a fase orgânica da água e impurezas. A fase orgânica foi retirada com o auxílio de pipeta e transferida para estufa a 70°C durante 12 horas para evaporação do n-hexano. Após, o óleo extraído foi filtrado a vácuo, antes de ser submetido às reações de esterificação.

Para produção de biodiesel foram utilizados álcool, óleo residual extraído na etapa anterior e catalisador. Utilizou-se o etanol e o ácido sulfúrico como catalisador.

As reações foram realizadas em erlenmeyers de 125 mL, contendo 10 g do óleo residual, 90 g de álcool etílico e 0,15 g de ácido sulfúrico concentrado (1,5% p/p em relação ao óleo), na temperatura de 70°C, sob agitação por 4 horas. Após este período, foi retirada do meio reacional uma alíquota para quantificação do biodiesel. Para tanto, amostras foram enviadas ao laboratório da Bioagri Ambiental em Piracicaba-SP, onde foram analisados os seguintes parâmetros do biodiesel formado: viscosidade cinemática a 40°C, massa específica a 20°C, teor de água, poder de fulgor, índice de acidez e teor de éster, de acordo com as normas apresentadas na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Parâmetros analisadas e métodos de análises

Parâmetro	Método de Ensaio	Referência
Massa específica a 20°C	NBR 7148	ABNT, 2013
Viscosidade cinemática a 40°C	NBR 10441	ABNT, 2014
Teor de água	ASTM D 6304	ASTM, 2007
Ponto de fulgor	NBR 14598	ABNT, 2012
Índice de acidez	NBR 14448	ABNT, 2013
Teor de éster	EN 14103	DIN, 2011

Nas reações de esterificação são avaliadas as seguintes variáveis: razão molar entre o álcool e a gordura, a concentração percentual do catalisador em relação à massa de gordura,

temperatura e o tempo de duração da reação. Entretanto, na presente pesquisa, as concentrações dos reagentes e as condições da reação foram fundamentadas em dados da revisão da literatura (OLIVEIRA, 2004; BARCZA, 2007; LUCENA, 2008; OLIVEIRA, 2012).

5.2.3. Degradação de material flutuante

Também, foi avaliada a potencialidade da degradação aeróbia e anaeróbia do material flutuante removido nos desarenadores de ETEs. Para tanto, foram utilizados quatro reatores de bancada, todos com as mesmas dimensões (desenho em anexo II) e volume útil de 20 litros. Em dois reatores foram avaliadas a degradação anaeróbia e nos outros dois avaliou-se a degradação aeróbia.

Para promover a homogeneização da gordura nos reatores foram previstos misturadores com gradiente fixo de 50 s^{-1} . Cada misturador era composto por dois conjuntos de paletas: um foi instalado próximo à superfície e outro próximo ao fundo, de modo a provocar o fluxo descendente na região central do reator.

Nos quatro reatores foram previstos: ponto de amostragem para coletas de amostras a serem realizadas durante o monitoramento dos reatores; descarga de fundo para esvaziamento dos reatores; inspeções para possível manutenção.

Nos reatores aeróbios foram utilizados aeradores do tipo aquário e pedras porosas para promover a aeração necessária ao sistema. Nos reatores anaeróbios, foram previstos ponto de amostragem para coletar os gases gerados no sistema.

Na Figura 5.2 encontra-se desenho esquemático dos reatores de bancada (aeróbio e anaeróbio) para a degradação do material flutuante.

Figura 5.2– Esquema ilustrativo dos reatores de bancada para degradação do material flutuante

Inicialmente, foi fixado o tempo de detenção médio de 20 dias, em função dos resultados obtidos na pesquisa que avaliou a degradação anaeróbica e aeróbica do lodo de fossas e tanques sépticos (BORGES, 2009). Entretanto, a partir dos resultados preliminares, verificou-se que o mesmo estava muito elevado. Decidiu-se, posteriormente, que seriam analisados os tempos de detenção médios de 5 e 10 dias. Foram realizados três ensaios para cada tempo de detenção avaliado. Esses procedimentos visam resultados práticos para servirem de subsídios para futuros projetos dessas unidades.

O material flutuante removido no desarenador foi peneirado antes de ser armazenado em tanque com capacidade de 150 litros. Tal procedimento visou à remoção de materiais grosseiros presente no resíduo.

A alimentação dos reatores de bancada foi realizada mediante utilização de bomba dosadora peristáltica da Gilson, modelo Minipuls Evolution, com capacidade de $300 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Como os tempos de detenção a serem analisados são altos, as vazões da bomba seriam estritamente baixas, o que provavelmente ocasionaria problemas de entupimentos, bem como os resultados dos ensaios poderiam não ser representativos. Dessa forma, foi previsto temporizador para acionar a bomba com vazão maior em intervalos de tempo estabelecidos.

Na Figura 5.3 está apresentada ilustração da unidade instalada na ETE Monjolinho, em local cedido pelo SAAE.

Figura 5.3– Ilustração da unidade experimental de bancada instalada para degradação da gordura

Os reatores foram instalados em local coberto a temperatura ambiente (10 a 30°C). Para cada tempo de detenção analisado foram coletadas amostras afluente (tanque de armazenamento) e efluente aos reatores e realizadas as seguintes análises: DQO, solúveis em hexano, alcalinidade, pH, série de sólidos. Ressalta-se que antes de realizar a coleta no tanque de armazenamento, o material era homogeneizado.

Eram preparadas amostras compostas dos efluentes, com alíquotas coletadas durante 24 horas de operação dos reatores. As amostras eram mantidas sob refrigeração a 4°C, para preservar a sua representatividade e conservação, até serem submetidas à análise.

No caso dos reatores anaeróbios, foi monitorada a formação do biogás em seu interior mediante o método volumétrico que se baseou na medição direta do volume de metano. Nesse método, para se medir o volume apenas de metano foi necessária “lavagem” do biogás com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 15% para absorver o CO₂ produzido no biogás. Esse procedimento assume que o CO₂ e o CH₄ são os principais constituintes do biogás e

consideraram que a maior parte da amônia (NH_3) e metade do sulfeto de hidrogênio (H_2S), se presentes, estarão ionizados e dissolvidos na fase líquida como NH_4^+ e HS^- .

Os reatores anaeróbios foram conectados com mangueiras de silicone aos frascos do tipo Mariotte, os quais continham solução de NaOH. O volume deslocado desses frascos era quantificado, mediante utilização de uma proveta graduada, que correspondeu ao volume de metano proveniente do biogás produzido.

5.3. Resultados

5.3.1. Caracterização do material flutuante

Na Tabela 5.2 apresentam-se os resultados da caracterização do material flutuante removido nos desarenadores da ETE Monjolinho São Carlos-SP. De acordo com os valores apresentados, verificou-se:

- A relação média obtida entre a DBO e a DQO foi aproximadamente de 0,44, demonstrando que a fração biodegradável é elevada, o que indica a potencialidade de utilização de tratamento biológico para este tipo de material;
- Cerca de 78% do teor de sólidos são orgânicos, corroborando para o fato que existe potencial para degradação biológica;
- Os resultados das variáveis DQO, sólidos dissolvidos totais e sólidos suspensos totais foram expressivamente inferiores aos valores encontrados na literatura técnica especializada para espuma removida em desarenador. Por exemplo, o resultado obtido da DQO para o material flutuante removido na ETE Monjolinho foi de 83.924 mg.L^{-1} , sendo que o valor da concentração média apresentado por Canler *et al.* (2001) foi de $181.000 \text{ mg.L}^{-1}$;
- As características médias do material flutuante removido no tratamento preliminar na ETE Monjolinho são semelhantes àsquelas obtidas para espuma acumulada nos separadores trifásicos de reatores anaeróbios (SOUZA 2006; PEREIRA, 2007, RAMOS, 2008; PEREIRA, 2012);
- Os valores de óleos e graxas (faixa de 1.790 mg.L^{-1} a 20.459 mg.L^{-1}) foram expressivamente inferiores aos valores citados em publicação pertinente a resíduo do saneamento para produção de biodiesel, conforme pode ser observado na Tabela 5.10 (OLIVEIRA, 2012).

Tabela 5.16 – Caracterização do material flutuante removido nos desarenadores da ETE Monjolinho São Carlos- SP

Parâmetro	Unidade	Média	Faixa
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	3.094	391-7.115
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	37.338	4.339-95.107
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	83.924	11.080-187.200
Fosfato total	(mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	546	260-1.038
Óleos e graxas	(mg.L ⁻¹)	9.773	1.790-20.459
pH	-	6,38	5,7-7,27
Sólidos sedimentáveis	(mL.L ⁻¹ .h ⁻¹)	675	92-980
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	34.945	5.278-66.909
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	7.772	1.082-15.266
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	27.172	4.196-51.643
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	26.449	4.628-47.000
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	5.150	857-9.800
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	21.299	3.771-38.100
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	9.508	650-24.324
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	2.970	225-7.766
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	6.538	425-17.659

5.3.2. Aproveitamento do material flutuante para produção de biodiesel

A Tabela 5.17 mostra o resultado da caracterização físico-química da espuma removida nos desarenadores da ETE Monjolinho.

Tabela 5.17 – Resultado da caracterização físico-química dos “óleos e graxas”extraídos do material flutuante removido nos desarenadores

Parâmetro	Unidade	Amostra 1	Amostra 2
pH	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	6,17	5,70
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	67.800	44.500
Óleos e graxas	(mg.L ⁻¹)	9.987	2.052
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	33.178	24.584
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	7.017	4.360
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	26.161	20.224
Relação STV/ST	-	0,79	0,82

As duas amostras analisadas apresentaram valores de pH próximos ao encontrado por Oliveira (2012) para a Escuma da Caixa de Gordura da Estação de Tratamento de Efluentes (ECG-ETE) de 5,71. Usualmente, o pH de alguns óleos residuais são ácidos, como é o caso da escuma dos óleos extraídos da caixa de gordura industrial e da caixa de gordura de restaurantes universitário, conforme pode ser visualizado na Tabela 5.10. O pH é influenciado pelo tipo de resíduo afluyente na caixa de gordura, podendo indicar o estado do material graxo neste dispositivo, visto que em pH elevado, há o favorecimento da saponificação e emulsificação do material graxo (MENDES *et al.*, 2005).

Os valores de DQO, óleos e graxas e sólidos das amostras de óleos extraídos do material flutuante removido nos desarenadores da ETE Monjolinho foram expressivamente inferiores aos apresentados na por Oliveira (2012) para todos os tipos de escuma/lodo avaliados: da Caixa de Gordura de uma Indústria de Alimentos (ECG-IND); da Caixa de Gordura do Restaurante Universitário (ECG-RU); da Caixa de Gordura da Estação de Tratamento de Efluentes (ECG-ETE); e dos Tanques e Fossas Sépticas (LTFS). Tal observação pode ser explicada pelos seguintes fatores:

- A coleta e destino adequado dos óleos e gorduras utilizados em cozinhas (que antes eram despejados na rede coletora de esgoto) estão cada vez mais estimulados pelos órgãos ambientais. Em São Carlos-SP esses resíduos são coletados nas residências por Cooperativa ou entregues nos pontos de entrega voluntária situados em escolas municipais, centros comunitários com projetos de empresas privadas e supermercados, os quais são encaminhados para reciclagem.
- Uma grande fonte de contaminação de óleos e gorduras são os restaurantes e lanchonetes das Universidades de São Carlos, os quais também passaram a participar de programas de reciclagem. Como exemplo, no Campus da USP o óleo proveniente do restaurante é armazenado e enviado ao projeto Cata Óleo da USP Ribeirão Preto-SP para a transformação em Biodiesel; e os óleos e gorduras gerados em bares, restaurantes e lanchonetes são armazenados temporariamente em garrafas de PET, galões e baldes, e posteriormente, são doados a entidades ou integrantes da comunidade do campus para a fabricação caseira de sabão.
- Outra questão relevante é que na ETE Monjolinho só é permitido descarregar o material do caminhão limpa fossa se o mesmo for proveniente de tanques e fossas sépticas, ou seja, são proibidos os despejos provenientes de caixas de gordura de industriais alimentícias, caixas separadoras de água e óleo de postos de combustíveis,

dentre outros, que possuem elevado potencial de contaminação de óleos e graxas. Sabe-se que é comum no momento da limpeza dos tanques ou fossas, também coletar o material das caixas de gorduras das residências, o que poderia aumentar a quantidade de óleos e graxas na estação. Entretanto, constatou-se que nos dias das coletas, não houveram descarregamentos de caminhão limpa fossa.

Na Tabela 5.18 encontram-se os resultados da caracterização do material produzido pela reação de alcoólise da espuma removido nos desarenadores, utilizando a reação de esterificação, na condição de temperatura de 70°C e razão molar óleo:álcool de 1:9.

Tabela 5.18 – Caracterização físico-química do material produzido na reação de esterificação

Parâmetro	Unidade	Limites	Amostra 1	Amostra 2
Massa específica a 20°C	kg m ⁻³	850 - 900	869,3	871,5
Viscosidade cinemática a 40°C	mm ² s ⁻¹	3,0 - 6,0	3,22	3,07
Teor de água	mg kg ⁻¹	máx. 200	714,2	680,7
Ponto de fulgor	°C	mín. 100,0	97,8	92,4
Índice de acidez	mg KOH g ⁻¹	máx. 0,50	< 0,10	< 0,10
Teor de éster	% massa	mín. 96,5	N.D	N.D

N.D = não detectado

De acordo com os valores apresentados na Tabela 5.18, verificou-se que, nas condições avaliadas, a produção de biodiesel a partir da espuma removida nos desarenadores da ETE Monjolinho, não apresentou bons resultados, tendo em vista que os parâmetros teor de água, ponto de fulgor e teor de éster estão em desacordo com a especificação da Agencia Nacional de Petróleo e Biocombustíveis.

Muitos trabalhos têm obtido sucesso na produção de biodiesel a partir do material extraído nas caixas de gordura de restaurantes, devido à elevada concentração de óleos e graxas. Segundo Pedroso *et al.* (2012) a caixa de gordura de restaurantes possui teores chega a teores entre 30% e 80% de gordura.

5.3.3. Degradação biológica do material flutuante removido nos desarenadores

5.3.3.1. Dificuldades gerais

Durante toda a fase experimental muitas dificuldades foram encontradas, tanto na parte de coleta quanto na parte de operação dos reatores, conforme descrição a seguir.

O material flutuante acumulado na superfície dos desarenadores é arrastado pela ponte para um canal de coleta e a seguir é direcionado por gravidade para o reator de degradação de gorduras. A coleta desse material foi efetuada no canal mediante utilização de três recipientes, todos com capacidade de 2 litros. Ocorre, entretanto, que esse canal é de difícil acesso, sendo possível coletar o material apenas em seu início, onde era possível, com auxílio de uma enxada, posicionar os recipientes para coleta. Outro ponto a ser destacado, é que a gordura ao invés de seguir por gravidade para o tanque de degradação acumula-se no canal (Figura 5.4), sendo necessários jatos de águas para encaminhá-la até a unidade de tratamento. Desse modo, foi estabelecida como rotina operacional a limpeza desse canal. Foi solicitado aos operadores que, durante a coleta desse material, não acionassem a válvula de água de reúso para limpeza, de modo a não interferir na amostragem (i.e. diluição). Mesmo assim, em algumas oportunidades, durante o período em que foram realizados os ensaios, alguns operadores realizaram a limpeza.

Figura 5.4 – (a) gordura acumulada no canal de coleta (b) diluição da gordura com água de reúso para auxiliar no encaminhamento da mesma ao tanque de degradação

Os principais problemas referentes à operação dos reatores foram:

- Para iniciar os ensaios, foi requerido volume de aproximadamente 88 litros de material flutuante para que a capacidade dos quatro reatores avaliados fosse atingida. Como havia limitação na coleta devido ao pouco material removido nos desarenadores e às

dificuldades mencionadas anteriormente, eram necessários de 3 a 5 dias de coleta. Ressalta-se que a amostra coletada era armazenada numa caixa de água de 150 litros, localizada em local coberto sob temperatura ambiente. Dessa forma, pode ter ocorrido degradação parcial do material antes de iniciar os ensaios.

- Visando minimizar os entupimentos no sistema de bombeamento de “óleos e graxas” aos reatores, foi previsto peneiramento da mesma antes de ser despejada no tanque armazenamento (caixa de 150 litros). Apesar dessa iniciativa, constatou-se entupimento das mangueiras de silicone devido à presença de ovos e larvas de moscas, sendo necessária a paralisação temporária dos ensaios para sua desobstrução.

5.3.3.2. Ensaios preliminares dos tratamentos biológicos

Inicialmente, foi realizado ensaio com o tempo de detenção de 20 dias, os resultados desse ensaio estão apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Resultados do ensaio realizado com tempo de detenção de 20 dias

Parâmetro	Unidade	Afluente	Efluente			
			Anaeróbio		Aeróbio	
			Reator 1	Reator 2	Reator 1	Reator 2
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ L ⁻¹)	678	443	403	370	361
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	46.563	1.162	904	617	592
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	61.200	2.884	1.850	1.158	1.064
Óleos e graxas	(mg.L ⁻¹)	9.569	429	285	189	118
pH	-	6,12	6,97	7,02	7,52	7,82
Sólidos sedimentáveis	(mL.L ⁻¹ .h ⁻¹)	400	12	8	22	14
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	24.278	2.246	1.221	1.063	1.130
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	5.061	718	306	271	386
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	19.217	1.528	915	792	744
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	17.400	1.120	571	525	350
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	3.580	210	64	85	60
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	13.820	910	507	440	290
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	6.878	1.126	650	538	780
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	1.481	508	242	186	326
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	5.397	618	408	352	454

Na Figura 5.5 estão apresentadas as eficiências de remoção dos parâmetros: DQO, DBO, óleos e graxas, sólidos totais e sólidos totais voláteis do material flutuante após o tempo de detenção de 20 dias.

Figura 5.5 – Eficiência de remoção do material flutuante para o tempo de detenção de 20 dias

De acordo com os resultados do ensaio preliminar, constatou-se que:

- A relação média obtida entre a DBO e a DQO foi aproximadamente de 0,76 e cerca de 79% do teor de sólidos eram orgânicos, demonstrando que a fração biodegradável é elevada; o que indica a potencialidade de utilização de tratamento biológico para este tipo de material;
- Não seria necessária correção de pH para degradação biológica da gordura nos próximos ensaios, tendo em vista que valores de pH apresentaram-se próximos a 7,0;
- As eficiências de remoção foram significativamente elevadas para o tempo de detenção analisado (20 dias), indicando potencialidade para realização de ensaios com tempo de detenção menor.

5.3.3.3. Ensaios experimentais

Nas Tabelas 5.20 e 5.21 encontram-se dispostos os resultados dos parâmetros analisados nos ensaios de degradação anaeróbia do material flutuante para o tempo de detenção de 5 e 10 dias, respectivamente. De acordo com os resultados, verificou-se que, para ambos os tempos de detenção analisados, os afluentes aos reatores de degradação apresentaram elevadas taxas de DQO e DBO₅, indicando grande concentração de matéria orgânica. Também, observou-se grande concentração de óleos e graxas. Corroborando com os relatos de literatura, em que elevadas concentrações de óleos e graxas, geralmente, estão associadas a grandes cargas de matéria orgânica.

Tabela 5.20 – Resultados da biodegradação anaeróbia do material flutuante para o tempo de detenção de 5 dias

Parâmetro	Unidade	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3			Média	
		Afluyente	Efluente1	Efluente2	Afluyente	Efluente1	Efluente2	Afluyente	Efluente1	Efluente2	Afluyente	Efluente
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	5.523	1.874	1.776	3.355	1.950	2.056	4.825	2.655	2.301	4.568	2.102
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	53.000	9.500	9.500	33.900	6.820	6.930	34.730	9.411	8.503	40.543	8.444
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	164.500	20.680	21.800	84.750	16.550	17.050	85.600	22.550	23.450	111.617	20.347
Fosfato total	(mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	475	195	162	546	239	235	446	197	165	489	199
Óleos e graxas	(mg.L ⁻¹)	16.360	1.412	1.584	9.569	966	986	10.475	1.448	1.412	12.135	1.301
pH	-	5,94	6,80	6,60	5,70	7,65	7,50	6,62	7,86	7,91	6,09	7,39
Sólidos sedimentáveis	(mL.L ⁻¹ .h ⁻¹)	980	140	124	300	68	63	900	120	90	727	101
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	66.909	7.878	7.611	51.836	7.392	7.415	42.218	9.063	9.065	53.654	8.071
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	15.266	1.612	1.562	13.277	1.552	1.521	10.214	1.947	2.099	12.919	1.716
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	51.643	6.266	6.049	38.559	5.840	5.894	32.004	7.116	6.966	40.735	6.355
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	43.700	6.300	6.155	27.512	5.850	5.933	34.950	7.325	7.333	35.387	6.483
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	7.500	1.000	955	6.612	925	1.033	7.150	1.375	1.100	7.087	1.065
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	36.200	5.300	5.200	20.900	4.925	4.800	27.800	5.950	6.233	28.300	5.401
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	23.209	1.578	1.456	24.324	1.542	1.482	7.268	1.738	1.732	18.267	1.588
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	7.766	612	607	6.665	627	588	3.064	572	499	5.832	584
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	15.443	966	849	17.659	915	1.094	4.204	1.166	1.233	12.435	1.037

Tabela 5.21 – Resultados da biodegradação anaeróbia do material flutuante para o tempo de detenção de 10 dias

Parâmetro	Unidade	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3			Média	
		Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	7.115	2.715	2.721	4.121	3.238	3.225	5.643	4.338	3.779	5.626	3.336
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	82.860	5.791	5.212	95.107	10.600	11.300	67.500	8.196	8.906	81.822	8.334
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	137.000	19.120	18.320	187.200	29.350	28.400	162.000	30.200	31.200	162.067	26.098
Fosfato total	(mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	1.038	384	359	649	272	268	993	531	442	893	376
Óleos e graxas	(mg.L ⁻¹)	13.862	1.991	1.984	20.459	1.689	1.502	15.420	1.682	1.844	16.580	1.782
pH	-	6,54	7,88	7,79	5,96	7,70	7,76	6,83	5,83	5,98	6,44	7,16
Sólidos sedimentáveis	(mL.L ⁻¹ .h ⁻¹)	950	66	60	980	116	110	950	150	150	960	109
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	56.888	7.604	7.028	48.347	9.517	10.004	57.213	9.517	10.004	54.149	8.946
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	13.490	1.558	1.531	9.323	1.730	1.862	13.410	1.950	2.179	12.074	1.802
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	43.398	6.046	5.497	39.024	7.787	8.142	43.803	7.567	7.825	42.075	7.144
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	43.500	5.633	5.175	47.000	8.000	7.900	38.600	7.050	7.366	43.033	6.854
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	6.033	1.000	875	6.518	920	850	9.800	1.252	1.246	7.450	1.024
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	37.467	4.633	4.300	40.482	7.080	7.050	28.800	5.799	6.121	35.583	5.830
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	13.398	1.971	1.853	1.347	1.517	2.104	18.613	2.467	2.638	11.119	2.092
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	7.457	558	656	423	719	1.012	3.610	698	934	3.830	763
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	5.941	1.413	1.197	924	798	1.092	8.253	1.768	1.704	5.039	1.329

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram, as representações gráficas, das quantidades de gás metano acumuladas durante os ensaios realizados com os tempos de detenção de 5 dias e 10 dias, respectivamente, para os quais foram aplicadas cargas diferentes, o que explica a divergência no volume acumulado de metano observado.

Figura 5.6 – Volume de metano produzido nos reatores anaeróbios para os ensaios com o tempo de detenção de 5 dias

Figura 5.7 – Volume de metano produzido nos reatores anaeróbios para os ensaios com o tempo de detenção de 10 dias

Ressalta-se que para cada ensaio foi apresentada nos gráficos a média dos volumes acumulados para os dois reatores anaeróbios.

No processo anaeróbio a eficiência de remoção da material orgânico depende da atividade metanogênica do lodo. Portanto, há relação estequiométrica “teórica” entre o volume do metano produzido e a fração de matéria orgânica expressa em DQO removida, sendo que o valor teórico é de 0,354 L de metano para cada grama de DQO removida.

A relação média entre o volume de metano produzido e a DQO removida para os tempos de detenção de 5 dias e 10 dias foram, respectivamente, de 0,002 L.g⁻¹ e 0,001 L.g⁻¹. Portanto, constatou-se que a produção de metano nos ensaios experimentais foi muito inferior àquela apregoada em conceitos teóricos.

Nas Tabelas 5.22 e 5.23 encontram-se os resultados dos parâmetros analisados nos ensaios de degradação aeróbia do material flutuante para os tempos de detenção de 5 dias e 10 dias, respectivamente.

Tabela 5.22 – Resultados da biodegradação aeróbia do material flutuante para o tempo de detenção de 5 dias

Parâmetro	Unidade	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3			Média	
		Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	5.523	1.933	1.802	3.355	1.908	1.823	4.825	2.721	2.664	4.568	2.142
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	53.000	9.300	9.500	33.900	5.810	6.150	34.730	9.078	8.322	40.543	8.027
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	164.500	21.120	19.040	84.750	15.850	14.400	85.600	29.560	25.640	111.617	20.935
Fosfato total	(mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	475	145	139	546	232	229	446	188	178	489	185
Óleos e graxas	(mg.L ⁻¹)	16.360	1.516	1.352	9.569	902	814	10.475	1.660	1.766	12.135	1.335
pH	-	5,94	7,83	7,26	5,70	7,72	7,80	6,62	8,08	8,04	6,09	7,79
Sólidos sedimentáveis	(mL.L ⁻¹ .h ⁻¹)	980	108	96	300	60	64	900	112	100	727	90
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	66.909	8.704	7.930	51.836	7.578	6.880	42.218	10.647	11.164	53.654	8.817
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	15.266	1.664	1.584	13.277	1.564	1.296	10.214	2.277	2.395	12.919	1.797
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	51.643	7.040	6.346	38.559	6.014	5.584	32.004	8.370	8.769	40.735	7.021
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	43.700	7.333	6.450	27.512	6.286	5.614	34.950	8.575	8.675	35.387	7.156
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	7.500	1.067	950	6.612	828	843	7.150	1.600	1.625	7.087	1.152
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	36.200	6.266	5.500	20.900	5.458	4.771	27.800	6.975	7.050	28.300	6.003
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	23.209	1.371	1.480	24.324	1.292	1.266	7.268	2.072	2.289	18.267	1.628
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	7.766	597	634	6.665	736	753	3.064	677	770	5.832	695
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	15.443	774	846	17.659	556	513	4.204	1.395	1.519	12.435	934

Tabela 5.23 – Resultados da biodegradação aeróbia do material flutuante para o tempo de detenção de 10 dias

Parâmetro	Unidade	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3			Média	
		Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente1	Efluente2	Afluente	Efluente
Alcalinidade	(mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	7.115	2.655	2.378	4.121	3.115	3.354	5.643	3.155	3.357	5.626	3.002
DBO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	82.860	3.779	4.126	95.107	9.600	9.200	67.500	9.690	9.163	81.822	7.593
DQO	(mg O ₂ .L ⁻¹)	137.000	19.920	18.160	187.200	19.700	18.320	162.000	33.100	32.700	162.067	23.650
Fosfato total	(mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	1.038	331	380	649	308	306	993	418	510	893	376
Óleos e graxas	(mg.L ⁻¹)	13.862	1.868	1.976	20.459	1.330	1.276	15.420	1.761	1.712	16.580	1.654
pH	-	6,54	8,06	7,97	5,96	7,52	7,64	6,83	6,81	6,89	6,44	7,48
Sólidos sedimentáveis	(mL.L ⁻¹ .h ⁻¹)	950	56	60	980	156	160	950	100	110	960	107
Sólidos Totais	(mg.L ⁻¹)	56.888	8.982	9.295	48.347	9.174	8.259	57.213	8.174	8.259	54.149	8.691
Sólidos Totais Fixos	(mg.L ⁻¹)	13.490	1.814	1.958	9.323	1.594	1.504	13.410	1.651	1.740	12.074	1.710
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L ⁻¹)	43.398	7.168	7.337	39.024	7.580	6.755	43.803	6.523	6.519	42.075	6.980
Sólidos Suspensos	(mg.L ⁻¹)	43.500	6.667	6.567	47.000	6.514	6.320	38.600	5.722	5.835	43.033	6.271
Sólidos Suspensos Fixos	(mg.L ⁻¹)	6.033	1.233	1.200	6.518	1.824	880	9.800	1.058	1.066	7.450	1.210
Sólidos Suspensos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	37.467	5.434	5.367	40.482	4.690	5.440	28.800	4.664	4.769	35.583	5.061
Sólidos Dissolvidos Totais	(mg.L ⁻¹)	13.398	2.315	2.728	1.347	2.660	1.939	18.613	2.452	2.424	11.119	2.420
Sólidos Dissolvidos Fixos	(mg.L ⁻¹)	7.457	651	758	423	794	624	3.610	615	674	3.830	686
Sólidos Dissolvidos Voláteis	(mg.L ⁻¹)	5.941	2.315	1.970	924	1.866	1.315	8.253	1.837	1.750	5.039	1.842

Nas Figuras 5.8 e 5.9 encontram-se as eficiências médias de remoção de DQO, DBO, óleos e graxas, sólidos totais e sólidos totais voláteis do material flutuante após o tempo de detenção de 5 dias e 10 dias, respectivamente.

Figura 5.8 – Eficiência de remoção do material flutuante para o tempo de detenção de 5 dias

Figura 5.9 – Eficiência de remoção do material flutuante para o tempo de detenção de 10 dias

De acordo com os dados apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9, verificou-se:

- Elevadas eficiências de remoção para todos os parâmetros analisados em ambos os processos biológicos (anaeróbio e aeróbio);

- A degradação biológica do material flutuante permitiu a obtenção de eficiência de remoção de óleos e graxas em torno de 89%, em curto intervalo de tempo de detenção (5 dias);
- Houve acréscimo da eficiência de remoção, na maioria dos parâmetros analisados, com o aumento do tempo de detenção hidráulica de 5 para 10 dias. Esse aumento foi mais significativo para o parâmetro DBO, que obteve um valor em torno de 13,4% para degradação anaeróbia e 12,8% para a aeróbia;
- A degradação aeróbia apresentou valores de eficiências de remoção dos parâmetros analisados pouco superiores à degradação anaeróbia, para o tempo de detenção de 10 dias. Para o tempo de detenção de 5 dias, a degradação aeróbia obteve apenas eficiência de remoção de DBO superior à anaeróbia.

Diante do exposto, constatou-se que, tecnicamente, os dois processos analisados foram eficientes na degradação do material flutuante. Entretanto, a degradação anaeróbia é mais atrativa economicamente e possui a vantagem do reaproveitamento do biogás produzido.

5.4. Conclusões

Os ensaios experimentais com o material flutuante removido em desarenador permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

- A caracterização desse tipo de material demonstrou que a fração biodegradável é elevada, o que indica a potencialidade de utilização de tratamento biológico;
- Foram verificadas dificuldades técnicas na produção de biocombustível a partir do material flutuante removido em desarenador, tendo em vista que os parâmetros teor de água, ponto de fulgor e teor de éster apresentaram valores em desacordo com a especificação da Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis.
- A degradação biológica do material flutuante permitiu a obtenção de elevadas eficiências de remoção de DBO, DQO, óleos e graxas, sólidos totais e sólidos suspensos totais. Tecnicamente, não houve diferença entre os processos anaeróbio e aeróbio, ambos apresentaram elevada redução da carga orgânica. Entretanto, economicamente, a degradação anaeróbia se mostrou mais vantajosa, pelo fato de apresentar menor custo operacional (energia elétrica) e ter a possibilidade de aproveitamento do biogás produzido.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

As conclusões desta pesquisa referem-se ao cenário vigente na ETE Monjolinho SAAE- São Carlos- SP (com capacidade de atendimento de 258.000 habitantes), que pode ser considerada uma ETE de porte médio. Os resultados obtidos demonstraram a expressiva potencialidade técnica, econômica e ambiental, no que se refere ao aproveitamento energético dos resíduos retidos nos gradeamentos e ao uso da areia removida em desarenador como agregado miúdo na construção civil, em substituição à areia comum comercial.

Além disso, ficam evidentes os benefícios de se gerar biogás, a partir da degradação anaeróbia do material flutuante removido em desarenadores/removedores de “óleos e graxas” de ETE. Por sua vez, no que se refere à produção de biocombustível a partir desse material, os resultados desta pesquisa demonstraram que há dificuldades técnicas e baixa potencialidade de retorno econômico.

Em relação ao aspecto ambiental, a pesquisa demonstrou que aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de ETEs atendeu a ordem de prioridade estabelecida no Art. 9º da Lei 12.305/2010, em que todos os resíduos deverão ser reaproveitados e/ou tratados e somente os rejeitos desses processos poderão ser dispostos em aterros sanitários.

Somado a isso, os resíduos removidos no tratamento preliminar de ETEs, que antes eram rejeitos passaram a ser matéria-prima, apresentando vantagens como a economia de recursos naturais e a preservação do meio ambiente.

A seguir, destacam-se as principais conclusões para cada tipo de resíduo avaliado nesta pesquisa.

Quanto aos resíduos retidos nos gradeamentos, as seguintes conclusões foram instituídas:

- As caracterizações dos resíduos removidos nos gradeamentos grosseiro e fino demonstraram que os mesmos apresentam altos teores de umidade (83,20% para o gradeamento grosseiro e 83,89% para o gradeamento fino) e percentuais elevados da fração orgânica dos sólidos totais (em torno de 86,5 % e 90% para os gradeamentos grosseiro e fino, respectivamente). As caracterizações físicas desses resíduos confirmaram a maior porcentagem de matéria orgânica presentes nos mesmos e

indicaram forte influência da precipitação na quantidade de “pedras” presentes nas amostras.

- A unidade experimental do tipo estufa agrícola utilizada para a secagem dos resíduos foi eficaz, obtendo eficiências médias de remoção de umidade de aproximadamente 89% e 92% para os resíduos do gradeamento grosseiro e fino, respectivamente.
- As análises de poder calorífico e teor de cinzas demonstraram a potencialidade da geração de energia a partir dos resíduos removidos nos gradeamentos de estações de tratamento de esgoto. Demonstrando resultados promissores, com valores de poder calorífico superiores aos valores médios encontrados na literatura técnica especializada, para resíduos sólidos urbanos e lodo de estação de tratamento de esgoto.

Sobre o aproveitamento da areia removida em desarenador de ETE como agregado miúdo na construção civil, podem ser estruturadas as seguintes conclusões principais:

- Verificou-se a viabilidade da utilização da areia residual, removida nos desarenadores de ETEs, como agregado miúdo na incorporação de argamassas para revestimento e preparação de concreto não estrutural, desde que seja submetida ao procedimento de limpeza e secagem.
- O procedimento de limpeza e secagem da areia residual utilizada nesta pesquisa compreendeu as etapas de peneiramento, lavagem e secagem da mesma. Com esse procedimental foi possível alcançar as seguintes eficiências de remoção: em torno de 99,4% de umidade, 69,3% de sólidos totais voláteis e 5 log de *E. coli*.
- Foi comprovada a viabilidade técnica – a partir das resistências à compressão e à tração diametral –, ambiental e econômico da potencialidade de aproveitamento da mistura da areia residual com areia comercial na construção civil.

Em relação ao material flutuante removido em desarenador foram avaliadas duas alternativas para seu gerenciamento: tratamento biológico e uso na produção de biodiesel. Os resultados da parte experimental permitiram concluir que não foi possível obter biodiesel a partir do material flutuante removido nos desarenadores, uma vez que esse resíduo apresentou baixa concentração de óleos e graxas, se comparado à outras matérias primas, e grande quantidade de sólidos, sendo esses, em boa parte, de natureza orgânica. Em consequência disso, foi comprovada a potencialidade da degradação aeróbia e anaeróbia do material flutuante, resultando na redução de carga orgânica a ser aplicada nas unidades subsequentes do processo de tratamento.

6.2. Recomendações para trabalhos futuros

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa e priorizando as questões ambientais, tecnológicas e científicas, apresentam-se as seguintes sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros:

1) Resíduos removidos no gradeamento

- Avaliar o aproveitamento dos resíduos removidos no gradeamento como combustível em fornalhas de secadores de lodo em escala plena.
- Realizar a caracterização dos gases decorrentes do processo de combustão no caso de aproveitamento dos resíduos, após o tratamento adequado, de forma a assegurar o cumprimento dos limites de emissão dos poluentes.
- Efetuar teste com equipamentos destinados à separação de materiais grosseiros densos (pedras, vidro e etc.) do resíduo removido no gradeamento.

2) Material sedimentado removido no desarenador

- Realizar estudos complementares da caracterização microbiológica do material sedimentável removido no desarenador, com análise de ovos de helmintos.
- Avaliar a possibilidade de reduzir o porcentual de matéria orgânica e a densidade de micro-organismos presentes na areia residual mediante utilização de outros produtos para limpeza, diferente do hipoclorito de sódio.
- Estudar diferentes métodos para a secagem da areia, antes de sua utilização.
- Realizar ensaios de lixiviação e solubilização não só do concreto, mas também dos agregados miúdos utilizados em sua produção (areia residual e areia de referência) para avaliar o efeito do encapsulamento dos metais considerados perigosos.
- Recomenda-se que sejam realizados estudos complementares dos corpos de prova confeccionados com areia residual, para verificação da durabilidade dos mesmos, entre eles: resistência a sulfatos, resistência à penetração de cloretos.
- Realizar análise do poder calorífico do rejeito produzido na etapa de peneiramento do procedimento de limpeza e secagem, de forma avaliar seu potencial energético.
- Avaliar resistências dos concretos para traços com proporção de cimento: areia: brita diferentes da analisada.

3) Material flutuante removido no desarenador

- Quantificar o material flutuante removido no desarenador, pois atualmente não há monitoramento de rotina em ETEs.
- Aprimorar a remoção de óleos e graxas no tratamento preliminar, visando aproveitamento energético mediante a digestão anaeróbia desse material.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2012.

ABRELPE e PLASTIVIDA. **Caderno Informativo de recuperação energética**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/download/informativo_recuperacao_energetica.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2010.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WEF - WATER ENVIRONMENT FEDERATION. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21ª ed. APHA, AWWA, WEF, Washington, DC, EUA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 1982.

_____. **NBR 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cones**. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

_____. **NBR 49: Agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro, RJ, 2001.

_____. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____. **NBR 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

_____. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação – Procedimentos**. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

_____. **NBR 10005: Lixiviação de resíduos – Procedimentos**. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

_____. **NBR 10006: Solubilização de resíduos – Procedimentos**. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

_____. **NBR 10007: Amostragem de resíduos – Procedimentos.** Rio de Janeiro, RJ, 2004.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 15258: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro. 2006.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, RJ, 2007.

_____. **NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro. 2009.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro. 2009.

_____. **NBR 12.142 Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, RJ, 2010.

_____. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, RJ, 2011.

_____. **NBR 7221: Agregado — Índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 2012.

_____. **NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia.** Rio de Janeiro, RJ, 2013.

ABES. Tratamento preliminar (gradeamento, desarenadores, medição de vazão e coleta de amostras de efluentes). Disponível em: <<http://www.abes-dn.org.br/eventos/abes/1oficina-tratamento-preliminar>> Acesso em: 24 abr 2013

ARANDA, D.A.G. **A incineração controlada de resíduos sólidos: status mundial.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Mimeo. 2001.

ASTM D 240. American Society for Testing Materials In: Annual Book of ASTM Standards, D-240. **Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter.** West Conshohocken, PA: ASTM, 2014.

BATSTONE, D. J.; KELLER, J.; NEWELL, R. B.; NEWLAND, M. Modelling anaerobic degradation of complex wastewater. I model development. *Bioresource Technology*, v. 75, n. 1 p. 67 – 74, 2000.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** 5 ed. Rio de Janeiro:LTC. 2000. 480 p. v. II.

BOOCOCK, D.G.B., KONAR S.K., LEUNG, A., LY, L.D.. Fuels and chemicals from sewage sludge: The solvent extraction and composition of a lipid from raw sewage sludge. **Fuel**, v. 71 n.11, p. 1283–1289, 1992.

BORGES, N. B. **Caracterização e pré-tratamento de lodo de fossas e de tanques sépticos.** 2009. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BORGES, F. *et al.* Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, v. 17, n. 1/2, p. 27–32, 2008.

BORK, J. A. **Caracterização e Avaliação das Emissões do Uso de Lodo Sanitário Seco como Combustível em Combustor Ciclônico**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 45, de 25 de agosto de 2014. Ficam estabelecidas a especificação do biodiesel contida no Regulamento Técnico ANP nº 3/2014 e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional. **Diário oficial da União**, Brasília, DF, v. 167, p. 68-70, maio 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário oficial da União**, Brasília, DF, v. 167, p. 141-146, agosto. 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 316, de 20 de novembro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário oficial da União**, Brasília, DF, v. 224, p. 92-95, novembro. 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2006). Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário oficial da União**, Brasília, DF, v. 1, p. 131-137, dezembro. 2006.

BRASIL, Lei Federal Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília, v. 1, 2010.

BRASIL, Lei Federal Nº lei 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Brasília, v. 1, 2005.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). Code of practice for structural use of masonry: unreinforced masonry; BS 5628; part 3. London, 1985.

BROSCH, C.D. Fabricação de agregado leve a partir do lodo de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 23., 1975, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1975. p. 103-107.

BUEST, G. T. **Estudo da Substituição de Agregados Miúdos Naturais por Agregados Britados em Concretos**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2006.

CANAKCI, M.; VAN GERPEN, J. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 44, n. 6, p. 1429-1436, 2001.

CANAKCI, M.; GERPEN, J.V. A Pilot Plant to Produce Biodiesel from High Free Fatty Acid Feedstocks. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 46, p. 945-954, 2003.

CANÇADO, C. J.; LESSA, E. R.; PARREIRA, F. V. Determinação do teor de óleos e gorduras como interferentes nos processos de tratamento anaeróbio-aeróbio tratando esgoto de uma unidade hospitalar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABES, 2007.

CANÇADO, C. J.; LESSA, E. R.; ROCHA, C. R. C. Proposta metodológica para determinação do poder calorífico de resíduos sólidos domiciliares com enfoque na geração de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. **Anais...** Recife: ABES, 2009.

CANLER J.P., ROYER C., DUCHÈNE P. Aerobic biological treatment of grease from urban wastewater treatment plants. **Water Science & Technology**, v.44, n. (2-3), p. 219-226, 2001.

CARMO, D. F. **Tratamento biológico termofílico de efluentes de polpa através do processo combinado anaeróbio – aeróbio**. 2006. 268 f. Tese (Doutorado Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CHANG, F. C.; LIN, J. D.; TSAI, C. C.; WANG, K. S. Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash. **Water Science & Technology**, v. 62, n. 7, p. 1689-1693, 2010.

CHANG, N.; DAVILA, E. Municipal solid waste characterizations and management strategies for the lower rio grande valley, Texas. **Waste Management**, v. 28, n. 5, p. 776-794, 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. *et al.* Contribuição para a melhoria do projeto e da operação de reatores UASB tratando esgotos domésticos: gerenciamento da espuma. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. **Anais...** Recife:ABES, 2009.

CHIH-SHAN, L.; FU-TIEN J. Physical and chemical composition of hospital waste. **Infection Control and Hospital Epidemiology**, v. 14, n. 3, p. 145-150, 1993.

CHRISTOFF, P. **Produção de biodiesel a partir do óleo residual de fritura comercial. estudo de caso: Guaratuba, litoral paranaense**. 2007. 83 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologias) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Curitiba, 2007.

COFFEY, M. Energy and Power Generation: Maximising Biogas Yields from Sludge. **Filtration & Separation**, v. 46, n. 1, p.12-15, 2009.

CONESA, J. A. Incineração de Resíduos Sólidos, Universidade de Alicante, Departamento de Engenharia Química, Espanha. 2005. Disponível em: <<http://iq.ua.es>>. Acesso em: 26 Set 2014.

COSTA, A. J. C. **Análise de viabilidade da utilização de lodo coagulado com Cloreto de Polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas – Estudo de caso da ETA do município de Mirassol-SP**. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, v. 23, n.4, p. 531-537, 2000.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA -EPE. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2010 – Ano base: 2009. Disponível: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em: 11 Oct. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA -EPE. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2014 – Ano base: 2013. Disponível: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em: 5 Set. 2014.

ENVIRONQUIP Equipamentos. Disponível: <http://www.environquip.com.br/peneira-estatica.htm>. Acesso em: 26 Set 2014.

EPE (2011) - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). Balanco Energético Nacional 2014: Ano base 2013. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em: 05 Ago 2013.

Eurostat Structural Indicators , 2013. **Municipal waste statistics**. Bruxelas, 2014. Disponível em

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Municipal_waste_statistics>. Acesso em: 13 Jul 2013.

FONTES C. M. A. **Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento portland**. 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

FREEDMAN, B.; BUTTERFIELD, R. O.; PRYDE, E. H. Transesterification kinetics of soybean oil 1. **Journal American Oil Chemists Society**. v. 63, n. 10, p.1375 - 1380, 1986.

FOLGUERAS, M. B.; DÍAZ, R. M.; XIBERTA, J.; PRIETO, I. (2003). Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge. **Fuel**, v. 82, n. 15, p. 2051-2055, 2003.

Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163 p.

FEITOSA, M. C. A. **Lodo de esgoto: algumas aplicações em engenharia**. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2009.

FELIZARDO, P.; CORREIA, M.J.N.; RAPOSO, I.; MENDES, J.F.; BERKEMEIER, R.; BORDADO, J.M. Production of biodiesel from waste frying oils. **Waste Management**, v. 26, n. 5, p. 487-494, 2006.

FERRARI, R.A., OLIVEIRA, V.S., SCABIO, A. Biodiesel de soja - taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, CIDADE v. 28, n. 1, p. 19-23, 2005.

GARCIA-ENCINA, P. A.; MENCIA, A.; VILLAYERDE, S. Anaerobic degradation of grease and fats in bath tests. In: Anaerobic Digestion, 2004, Motreal, p.2400, 2004.

GIKAS, P.; NOLL, S.A.; STEDMAN, K. and TCHOBANOGLOUS, G. The Characterization and Testing of Wastewater Fine Screen Fresh Solids for Suitability As A Gasification Feedstock. In: Proc. 2nd International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management, 2010, Chania. p. 5-8, Chania, 2010.

GIKAS, P. *et al.* The characterization and testing of wastewater fine screen fresh solids for suitability as a gasification feedstock. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

GOMES. R. D, RAPOSO. E. P, SHIBUYA. R., WWF Brasil - Além das Grandes Hidrelétricas, Política para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. Disponível em: <http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_sumario_para_tomadores_de_decisao.pdf> Acesso em: 23 mar 2013.

HALALSHEH, M. *et al.* Effect of SRT and temperature on biological conversion and the related scum-forming potential. **Water Research**. v. 39, n. 12, p. 2475-2482, 2005.

HANSEN, T. C., NARUD, H. Strenght of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete International. **Design and construction**, v.5, n.7, p.79-83, 1983.

HAZARDOUS AND INDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT, 2., 2010, Chania, Greece. **Anais...** Greece, qual editora, 2010.

HELENE, P. R. L. T. **Manual de dosagem e controle do concreto**. SãoPaulo: Pini, 1993. 300 p.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. 2004. 190 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

HOPPEN. C. et al. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Revista Cerâmica**, v. 51, n. 318, p. 85-95, 2005.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Appendix k Waste Incineration -Renewables in Power Generaion: Towards a Better Environment (1997).

ISAIA, G.C. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, v. 1-2, 2005. 1579 p.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4 ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2005. 932 p.

KATHIRVALEA, S.; YUNUSA, M. N. M.; SOPIANB, K.; SAMSUDDINB, A.H. Energy potential from municipal solid waste in Malaysia. **Renewable Energy**. 29, n. 4, p. 559-567, 2004.

KRAUSE, G.G. **Avaliação da tecnologia de sistemas integrados gaseificação – Ciclo combinado para geração termelétrica no Brasil**. 1990. 63 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990.

KUMAR; J. S.; SUBBAIAH K. V.; PRASADA R. A. O. P. V. V. Waste to Energy: A Case Study of Eluru, A. P, India. **International Journal of Environmental Sciences**, v.1, n. 2, p. 151 - 162, 2010.

KUO, J. et al. The prospect and development of incinerators for municipal solid waste treatment and characteristics of their pollutants in Taiwan. **Applied Thermal Engineering**, v.28, n. 17, p. 2305-2314, 2008.

LA ROVERE, E.L.; SOARES, J.B.; OLIVEIRA, L.B.; LAURIA, T. Sustainable expansion of electricity sector: sustainability indicators as an instrument to support decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 422- 429, 2010.

LA SERNA, H.A.; REZENDE, M. M. Agregados para construção civil. Anepac- Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados Para a Construção Civil, 2009. p. 602-635. Disponível:< <http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/07/DNPM2009.pdf>> Acesso em: 10 Mar. 2014.

LE HYARIC, R.; CANLER, J. P.; BARILLON, P.; GOURDON, R. Characterization of screenings from three municipal wastewater treatment plants in the region rhône-alpes. **Water Science and Technology**, v. 60, n. 2, p. 525-531, 2009.

LETTINGA, G.; HULSHOFF POL, L. W. UASB - Process design for various types of wastewaters. **Water Science Technology**, v. 20, n. 8, p. 87-107, 1991.

LINS, G. A. **Impactos em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) – Rio de Janeiro – RJ**. 2010. 286 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

LOBÃO, E. **Panorama energético brasileiro**. 2008. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/Artigos/Panorama_energxtico_brasileiro.pdf>. Acesso em: 03 Mai. 2014.

LOBATO, L. C. S. *et al.* Avaliação de desempenho da pré-operação dos reatores UASB ETE Onça: capacidade instalada 2,05 m³/s. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, ABES, 2007. 1CD ROM.

LUCENA, I. L. Otimização do processo de obtenção de biodiesel através da adsorção de água formada durante a reação de esterificação. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.

MA, F.; HANNA, M.A. Biodiesel Production: a review, **Bioresource Technology**, v. 70, n. 1 p. 1-15, 1999.

MACHADO JUNIOR, C.; FURLANETO, C. J.; PREARO, L. C. A Energia Elétrica e as Fontes Alternativas de Energia na Gestão das Empresas. In: ENANPAD, XXXIII., São Paulo: ENANPAD. **Anais...** São Paulo, 2009.

MARQUES, M.V.; SILVA, C.F.G.; NACIUK, F.F.; FONTOURA, L.A.M. A química, os processos de obtenção e as especificações do biodiesel. **Revista Analytica**, n. 33, p. 72-87, 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3^a ed. São Paulo: IBRACON. 2008, 674 p.

MENDES, A. A., CASTRO, H. F., PEREIRA, E. B.; FURIGO JÚNIOR, A. Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 296-305. 2005.

MENDES B.; NASCIMENTO M.J.; OLIVEIRA J.S. Preliminary characterisation and proposal of microbiological quality standard of sand beaches. **Water Science and Technology**, v. 27, n. 3-4, p. 453– 456, 1993.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. Estágio atual da incineração no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7. 2000, Curitiba. Anais eletrônicos... Curitiba: ABLP, 2000. Disponível em: <http://www.resol.com.br/textos/Estado%20Atual%20da%20Incineracao%20no%20Brasil.htm> Acesso em: 2 Mar. 2012.

METCALF; EDDY. Wastewater engineering: Treatment disposal and reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill Inc. 1819p. 2003

MIKI, M. K. Dilemas do UASB. Seção —Práticas operacionais e de Empreendimento. **Revista DAE**, v. 183, n.1, p. 25-37, 2010.

MONDALA, A.; LIANG, K.; TOGHIANI, H.; HERNANDEZ, R.; FRENCH. Biodiesel production by in situ transesterification of municipal primary and secondary sludges. **Bioresource Technology**, v.100, n. 3, p. 1203-1210, 2009.

MOUNEIMNE, A. H. *et al.* Effect of saponification on the anaerobic digestion of solid fatty residues. **Bioresource Technology**, v. 90, n. 1, p. 89-94, 2003.

MOTHÉ, C. G.; CORREIA, D. Z.; CASTRO, B. C. S.; CAITANO, M. Otimização da produção de biodiesel a partir de óleo de mamona. **Revista Analytica**, v. 19, n. 19, p. 40-44, 2005.

MORETTO, E.; FETT, R. Tecnologia de óleos e gorduras vegetais. 1 edição. Rio de Janeiro: Varela, 178p. 1998.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª ed. São Paulo: Ed. Pini, 828 p. 1997

NOWAK, O.; KEIL, S.; FIMML C. Examples of energy self-sufficient municipal nutrient removal plants. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 1, p.1-6, 2011.

OLIVEIRA, J. P. Estudo da geração de biodiesel a partir de resíduos oleosos do saneamento ambiental. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2012.

OLIVEIRA, L. B. **Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil**. 2004. 247 f. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L.P. Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. **Energy Policy**. V. 31, n. 14, p. 1481-1491, 2003.

OLIVEIRA, L.B.; ARAUJO, M.S.M.; ROSA, L.P.; BARATA, M.; LA ROVERE, E.L. Analysis of the sustainability of using wastes in the brazilian power industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 3, p. 883-890, 2008.

PASQUALETTO, A.; BARBOSA, G.N. Aproveitamento do óleo residual de fritura na produção de biodiesel. In: Congresso Interamericano AIDIS, 31, 2008, Santiago, **Anais**. Santiago: AIDIS, 2008.

PAIVA, F. V.; AGUIAR, J. E.; MOREIRA, J. M. T. Avaliação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos com características domiciliar e comercial da cidade de Belo Horizonte/MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 4., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte:ABES, 2007.

PEDROSO, L. R. M. *et al.* Aproveitamento Energético de Passivos Ambientais de Estação de Tratamento de Esgoto-ETE – Produção de Biodiesel à partir de Gordura de Esgoto da ETE – Alegria. In: 2012, Salvador. Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel (5. : Salvador : 2012); Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel (8. : Salvador : 2012). , 2012. p. s.p .

PEREIRA, J. O. **Controle da formação de espuma e remoção de matéria orgânica em reator UASB com duplo estágio de coleta de biogás**. 2007. 67 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

PEREIRA, J. O.; CELANI, J. S. S.; CHERNICHARO, C. A. L. Control of scum accumulation in a double stage biogas collection (DSBC) UASB reactor treating domestic wastewater. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 6, p. 1077- 1083, 2009.

PEREIRA, J. O. **Desenvolvimento de reator UASB com duplo estágio de coleta de biogás (DECB), aplicado ao tratamento de esgoto sanitário, objetivando o controle da espuma e a granulação do lodo**. 2012. 169 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

POKORNA, E.; POSTELMANS, N.; JENICEK, P.; SCHREURS, S.; CARLEER, R.; YPERMAN, J. Study of bio-oils and solids from flash pyrolysis of sewage sludges. **Fuel**, v. 88, n. 8, p. 1344-1350, 2009.

PRADO, M. **Concepção e estudo de uma unidade compacta para tratamento preliminar de esgoto sanitário composta por separador hidrodinâmico por vórtice e grade fina de fluxo tangencial**. 2006. 268 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

QASIM, S.R. **Wastewater treatment plants, planning, design, and operation**. 2^a Ed. Waldbroonn: CRC Press. 1126 p. 1998.

RAMOS, R. A. **Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

RENOSAM. **The most efficient waste management system in Europe: Waste-to-energy in Denmark**. Dinamarca: RenoSam and Rambøll, 2006. 24 p.

ROCHA, N. E. P. **Avaliação de um sistema de tratamento de esgotos constituído de reator UASB e lagoa facultativa, em escala real**. 2002. 147 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

RODRIGUES, A. L. G. Efeitos de óleos e graxas para a tratabilidade de esgotos e poluição difusa. Disponível em:
<http://site.sabesp.com.br/uploads/file/audiencias_sustentabilidade/Efeitos%20de%20%C3%93leos%20e%20Graxas%20na%20Tratabilidade%20de%20Esgotos%20e%20Polui%C3%A7%C3%A3o%20Difusa.pdf> Acesso em: 17 mar 2013

RONNBACK, R.; SALMI, T.; VUORI, A.; HAARIO, H.; LEHTONEN, J.; SUNDQVIST, A.; TIRRONEN, E. Development of a kinetic model for the esterification of acetic acid with

methanol in the presence of a homogeneous acid catalyst. **Chemical Engineering Science**, v.52, n.19, p.3369- 3381, 1997.

ROSA, L.P. *et al.* Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos e óleos vegetais. In: TOLMASQUIM, M.T (Coord) **Fontes Alternativas de Energia no Brasil - CENERGIA**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. 515 p.

SAAD, E. B. **Etanólise do Óleo de Milho Empregando Catalisadores Alcalinos e Enzimáticos**. 2005. 115f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária**. 1984. 298 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

SANTOS, A. D. **Estudos das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo**. 2003. 282 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SANTOS, S. E. **Avaliação do desempenho operacional de um sistema reator UASB – Lagoa de polimento, Estudo de caso da ETE Juramento-MG**. 2003. 133 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 2003.

SEREC – Serviços de Engenharia Consultiva Fundamento conceitual e prático de operação e processos pertencentes à ETE. **Programa de Treinamento dos Operadores da ETE Monjolinho**. São Carlos: SEREC, 2010. 115 p.

SARTI, A. **Desempenho de reatores anaeróbios operação em bateladas sequenciais em escala piloto no tratamento de esgoto sanitário**. 2004. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

SILVA, M. F.; CARVALHO, E. H. Otimização do tratamento preliminar da ETE-Goiânia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte:ABES. 2007.

SILVA, J. O. **Caracterização do potencial energético e estudo físico-químico do lodo da estação de tratamento de esgoto do DMAE – Uberlândia –MG**. 2011. 81 f. Dissertação (Mestrado em Química). Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SILVA, M. B. **Qualidade Sanitária de Areias de Contato Primário em Escolas e Logradouros de Vitória – E.S.** Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Biológicas), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

SOARES, E. L. S. F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos.** 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SOUZA, C. A. Sistemas catalíticos na produção de biodiesel por meio de óleo residual. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais Eletrônicos.** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200040&lng=pt&nrm=abn>. Acesso em: 5 jun 2009.

SOUZA, C. L. *et al.* Production and characterization of scum and its role in odour control in UASB reactors treating domestic wastewater, **Water Science Technology**, v. 54, n. 9, p. 201-208, 2006.

SUAREZ, P.A.Z; SANTOS, A.L.F.; RODRIGUES, J.P.; ALVES, M.B. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 768-775, 2009.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Rio de Janeiro: ABES, 2003. 516 p.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A. Avaliação preliminar do aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS. **Recursos Energéticos - EPE**, n.79. n. 6/8, p. 1-77. 2008. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208_1.pdf>. Acesso em: 27 Ago. 2010.

TOMIELLO, E. C. **Análise dos resíduos sólidos de desarenador do tratamento preliminar de esgotos sanitários da Cidade de Maringá – PR.** Maringá – PR. 2008.130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

TORRES, E.A., CHIRINOS, H.D., SANTOS, D.C., Biodiesel: o combustível para o novo século. **Bahia Análise & Dados**, v. 16, n. 1, p. 89-95, 2006.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2013. Municipal Solid Waste in The United States: 2011 Facts and Figures. United States Environmental Protection Agency. Maio de 2013.

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente.** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 240 p.

VAN LIER, J. B.; VASHI, A.; VAN DER LUBBE, J.; HEFFERNAN, B. Anaerobic sewage treatment using UASB reactors: Engineering and operational aspects. In: FANG, H. H. P. (Editor) **Environmental anaerobic technology: applications and new developments;** London: Imperial College Press, 2011. p 59-87.

VERSIANI, B. M. **Desempenho de um reator submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos domésticos do campus da UFRJ.** 2005. 78 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

VIDAL, G.; CARVALHO, A.; MÉNDEZ, R.; LEMA, J. M. Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewaters. **Bioresource Thenology**, v. 74, n. 3, p. 231 – 239, 2000.

VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. In: _____ **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/ UFMG, 1996. v. 2. 211 p.

WANG, X.; JIN, Y.; WANG, Z.; MAHAR, R. B.; NIE, Y. A research on sintering characteristics and mechanisms of dried sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials**, v. 160, n. 2, p. 489–494, 2008.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1998) Design of municipal wastewater treatment plants. Water Environment Federation of practice n.8 4.ed v2.Alexandrina, USA: Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1994). Operations and Maintenance Subcommittee of the Technical Praticce Committee. Preliminary Treatment for Wasterwater Facilities. Alexandrina, USA: Water Environment Federation. Manual of Practice; OM-2).

G. TCHOBANOGLIOUS; F. BURTON; H. D. STENSEL WATESWATER Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. New York: McGraw-Hill, 2003.

WBCSD, 2000b, Eco-efficiency: Creating more value with less impact. World Business Council for Sustainable Development, Agosto. Disponível em: <http://www.wbcd.org/web/publications/eco_efficiency_creating_more_value.pdf> Acesso em: 17 out 2009.

WENYI, D.; JIANHUA, Y.; XIAODONG, L.; FEI, W.; YONG, C.; SHENGYONG, L. Emission characteristics of dioxins, furans and polycyclic aromatic hydrocarbons during

fluidized-bed combustion of sewage sludge. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, n. 12, p. 1747-1752, 2009.

WERTHER, J.; OGADA, T. Sewage sludge combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 25, n. 1, p. 55-116, 1999.

YAMANE, L. H. **Avaliação da higienização do resíduo de caixa de areia de estações de tratamento de esgoto**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

Anexo 1

CORTE B-B

ESCALA 1:40

FACHADA

PLANTA BAIXA

<p align="center">FAPESP VISTO E ACEITO</p>		<p>AVALIADO POR</p>		<p align="center">PESQUISA</p> <p align="center">ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL A SER IMPLANTADA NA ETE MOROJÓLIO</p> <p align="center">SECAGEM DE RESÍDUOS DE TRATAMENTO PRELIMINAR PLANTA E CORTES</p>				<p>REV. PL. 1/1</p>
ANALISADO	/	DES:	XX/XX	ÁREA PROJ: SISTEMA DE ESGOTO SANITÁRIO				<p>Nº DESENHO 000-XXX-XXX-XXX</p> <p>ESCALA 1:75</p>
ACEITO:	/	APROVADO POR:	XX/XX					
REVISÃO		ASS:	XX/XX	SIB-ÁREA PROJ: PROJETO DE PESQUISA - HIDROMECÂNICO				

Anexo 2

PLANTA SEM TAMPA

CORTE A-A

DETALHE TAMPA

N°	DATA	REVISÃO	AVALIADO POR	APROVADO POR	FAPESP		DESENHOS DE REFERÊNCIA	NÚMERO	NOTAS
					ACEITO	DATA			

1-MEDIDAS E ELEVACOES EM METRO, SALVO AS INDICADAS EM CONTRARIO.

FAPESP VISTO E ACEITO		AVALIADO POR		PESQUISA ESTACÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO REATORES PARA DEGRADAÇÃO DE MATERIAL FLUTUANTE		REV. PL. 1/1 Nº DESENHO EESC-SHS-002 ESCALA 1:15
ANALISADO	/	DES:	XX/XX	PLANTA E CORTES		
ACEITO:	/	PROJ:	XX/XX	ÁREA PROJ: SISTEMA DE ESGOTO SANITÁRIO		
VISTO:	/	APROVADO POR:	ASS.	CREA:	XX/XX	
SUB-ÁREA PROJ: PROJETO DE PESQUISA - HIDROMECÂNICO						