



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DESENVOLVIMENTO DE TIJOLOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE  
CARVÃO E LODO PROVENIENTES DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**MAURO VALÉRIO DA SILVA**

**Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Materiais**

**Orientadora:  
Profa. Dra. Denise Alves Fungaro**

**São Paulo  
2011**

## **AGRADECIMENTOS**

À Dra. Denise Alves Fungaro por ter me orientado ao longo deste trabalho.

À banca examinadora composta pela Dr. Afonso Rodrigues de Aquino e pelo Dr. Carlos Bauer.

Ao Centro de Química e Meio Ambiente e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela infraestrutura oferecida. Aos funcionários do IPEN.

Às Dras. Iara Camargo e Nilce Ortiz e pelo incentivo e amizade.

Ao responsável técnico Felipe Ferrufino pela realização das análises de massa específica.

À responsável técnica Sandra Cunha pela realização das análises de área superficial.

À Companhia Carbonífera do Cambuí Ltda. e à Usina Termelétrica de Figueira (PR), pelas amostras de cinzas de carvão.

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) pelas amostras de lodo.

Às Universidade Nove de Julho e o Universidade Estácio de Sá.

Às empresas Sahara Tecnologia por ceder os equipamentos para confecção dos tijolos, o Sr. Francisco Aguilar e Sr. Felipe.

O Instituto Falcão Bauer, Engenheiro. Mauricio e Engenheiro Ricardo pelos ensaios de compressão e teor de umidade.

À escola SENAI de São Bernardo do Campo, Professor Oscar, Professor Newton Sato.

Aos amigos do CQMA, pelo companheirismo, pela força e pelos momentos divertidos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a execução desse trabalho.

Às empresas habel Engenharia, Multibrink, SENAC e Srta. Cristiane, Engenheiro Jorge e todos os colegas de trabalho.

.

A minha esposa Priscila, meus filhos Guilherme, Henrique e Felipe, meus sogros Nina e Toninho pela paciência e ausência durante a pesquisa.

O sábio envergonha-se dos seus defeitos,  
mas não se envergonha de os corrigir.  
(Confúcio)

## **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**

### **RESUMO**

Os lodos provenientes de estação de tratamento de água brasileira são, frequentemente, dispostos e lançados diretamente nos corpos d'água, causando um impacto negativo no meio ambiente. Também, cinzas de carvão são produzidas pela queima de carvão em usinas termelétricas e é o resíduo sólido industrial mais gerado no sul do Brasil: cerca de 4 milhões ton/ano. A disposição eficiente das cinzas de carvão é um problema devido ao seu volume maciço e aos riscos nocivos para o ambiente.

O objetivo deste trabalho foi estudar a viabilidade da incorporação desses dois resíduos industriais em uma massa utilizada na fabricação de tijolos ecológicos.

As amostras de cinzas leve do filtro ciclone da usina termelétrica localizada no Município de Figueira, Estado do Paraná, Brasil e o lodo de estação de tratamento de água localizada no município de Terra Preta, Estado de São Paulo, Brasil, foram utilizados no estudo.

Tijolos de cinzas leve-lodo e cinzas leve-lodo-solo-cimento foram moldados e testados de acordo com padrões brasileiros. Os materiais foram caracterizados por análises físico-químicas, difração de raios X, análise térmica, análise morfológica, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier e análise granulométrica.

Os resultados indicaram que o lodo de estação de tratamento de água e as cinzas de carvão podem ser usados na manufatura de tijolos prensados solo-cimento de acordo com a Norma Brasileira NBR 10836/94.

# **Development of bricks with incorporation of coal ash and sludge from water treatment plant**

## **ABSTRACT**

Sludge from treatment water Brazilian plant station are, frequently, disposed and launched directly in the water bodies, causing a negative impact in the environment. Also, coal ashes is produced by burning of coal in coal-fired power stations and is the industrial solid waste most generated in southern Brazil: approximately 4 million tons/y. The efficient disposal of coal ashes is an issue due to its massive volume and harmful risks to the environment.

The aim of this work was study the feasibility of incorporating these two industrial wastes in a mass used in the manufacture of ecological bricks.

Samples of fly ashes from a cyclone filter from a coal-fired power plant located at Figueira County in Paraná State, Brazil and waterworks sludge of Terra Preta County in São Paulo State, Brazil, were used in the study.

Fly ash-sludge and fly ash-sludge-soil-cement bricks were molded and tested, according to the Brazilians Standards. The materials were characterized by physical-chemical analysis, X-ray diffraction, thermal analysis, morphological analysis, Fourier transform infrared spectroscopy and granulometric analysis.

The results indicate that the waterworks sludge and coal ashes have potential to be used on manufacturing soil-cement pressed bricks according to the of Brazilians Standards NBR 10836/94.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
2.1	Objetivos específicos	16
<b>3.</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>16</b>
3.1.	RESÍDUOS SÓLIDOS	16
3.1.1.	DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO	16
3.1.2.	GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS	18
3.1.3.	TECNOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO	19
3.1.4.	PREVENÇÃO, REDUÇÃO, REUSO E RECICLAGEM	22
3.1.5.	A LEGISLAÇÃO ATUAL	22
		23
3.2.	Cinzas de carvão	23
3.2.1.	Características Gerais	29
3.2.2.	MATERIAISPOZOLÂNICOS	32
3.2.3.	CLASSIFICAÇÃO DAS POZOLANAS	33
3.2.4.	UTILIZAÇÕESDAS CINZAS DE CARVÃO	
3.3.	LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	35
3.3.1.	Processos Convencionais de Tratamento de Água	35
3.3.2.	Características gerais do Lodo de ETA	38
3.3.3.	Disposição do lodo de ETA e alternativas de utilização	42

3.3.4. Alternativas de Tratamento Prévio, Desidratação e Disposição do Lodo	43
3.2.5. Estudos de Reaproveitamento de Lodo de ETA	49
3.4. Tijolos Ecológicos	55
3.4.1. Tijolo solo-cimento	55
3.4.2. Incorporação de resíduos na manufatura de tijolos ecológicos	61
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>63</b>
4.1. Materiais	63
4.1.1. Cinzas de Carvão	63
4.1.2 Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA)	64
4.2. Produção dos tijolos	64
4.3. Caracterizações dos materiais	65
4.3.1. Fluorescência de Raios-X	65
4.3.2. Difração de Raios-X	66
4.3.3. Determinação da Área superficial específica	66
4.3.4. Determinação de Massa específica	66
4.3.5. Espectroscopia no Infravermelho	67
4.3.6. Determinação do pH e da condutividade das cinzas de carvão	67
4.3.7 Microscopia eletrônica de varredura	67
4.3.8 Teor de umidade	67
4.3.9 Perda ao fogo	68
4.3.10 Determinação de pH do lodo	68
4.3.11. Determinação da composição granulométrica	69
4.3.12. Determinação da Matéria Orgânica	70
4.3.13. Capacidade de troca de cátions	70
4.3.14. Distribuição Granulométrica utilizando um conjunto de peneiras	72
4.3.15. Determinação da densidade aparente	72

4.4. Caracterização física do tijolo	72
4.4.1 Determinação da resistência à compressão	72
4.4.2 Determinação da absorção de água	73
4.4.3 Ensaio de caracterização e classificação ambiental dos tijolos	73
4.4.4. Avaliação estética	73
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>74</b>
5.1 Cinzas de carvão	74
5.1.1. Características Gerais	74
5.1.2. Caracterização Química	76
5.1.3. Caracterização Mineralógica	78
5.1.4. Caracterização Morfológica	80
5.1.5. Análise por Espectroscopia no Infravermelho	81
5.2. Lodo da ETA	83
5.2.1. Características Gerais	83
5.2.2 Distribuição granulométrica	87
5.2.3 Caracterização Química	90
5.2.4 Análise Termogravimétrica	91
5.2.5. Análise por Espectroscopia no Infravermelho	93
5.2.6 Caracterização Morfológica	93
5.2.7. Caracterização Mineralógica	94
5.3. Caracterização dos tijolos	94
5.3.1. Ensaio de ensaios de resistência à compressão e absorção de água	94
5.3.2. Avaliação estética	101
5.3.3. Caracterização química	103
5.3.4. Caracterização mineralógica	103
5.3.5. Ensaio de caracterização e classificação ambiental	105
5.3.5.1. Ensaio de lixiviação	105
5.3.5. 2. Ensaio de solubilização	105

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>106</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Cinzas Volantes.....	25
FIGURA 2. Depósito de cinzas de carvão ao redor de usina termoelétrica.....	27
FIGURA 3. Etapas do processo convencional da ETA.....	35
FIGURA 4. Lodo de ETA no decantador.....	35
FIGURA 5. Leito de secagem piloto da Unicamp.....	44
FIGURA 6. Esquemas ilustrativos dos sistemas de leitos de secagem tradicionais modificados por Cordeiro.....	44
FIGURA 7. Tijolos fabricados com lodo e argila.....	52
FIGURA 8. Amarração em encontro de paredes e detalhe do tijolo.....	58
FIGURA 9. Tijolo com estrutura modular.....	59
FIGURA 10. Curvas de distribuição granulométrica das cinzas leves de carvão.....	76
FIGURA 11. Difratoograma das cinzas de carvão.....	78
FIGURA 12. Imagens por MEV mostrando as diferentes morfologias encontradas para as partículas contidas nas cinzas: (A) formatos irregulares de carvão incombusto; (B) esféricas; (C) e (D) plenosferas e cenosferas.....	81
FIGURA 13. Espectro de infravermelho das cinzas de carvão.....	82
FIGURA 14. Distribuição granulométrica da amostra do lodo de	88

ETA.....	
FIGURA 15. Escalas granulométricas (Adaptado de: RODRIGUES, 1998).....	88
FIGURA 16. Classificação granulométrica para amostra do resíduo de ETA de acordo com o diagrama de Winkler.....	90
FIGURA 17. Análise termogravimétrica (ATG e DTG) do lodo de ETA.....	92
FIGURA 18. Espectro de infravermelho do lodo de ETA.....	93
FIGURA 19. Morfologia do lodo de ETA obtido por microscopia eletrônica de varredura.....	93
FIGURA 20. Difratoograma do lodo de ETA.....	94
FIGURA 21. Tijolo de cinza e lodo- lote 01 .....	97
FIGURA 22. Tijolo de cinza/ lodo/cimento/solo- lote 02.....	98
FIGURA 23. Tijolos de cinza/lodo/cimento/solo - lote 3 (frente) e tijolo de cinza/cal/lodo/solo-lote 04 (atrás).....	98
FIGURA 24. Tijolo de solo/cimento – lote 05.....	99
FIGURA 25. Tijolo de solo/cimento - lote 06.....	99
FIGURA 26. Tijolo de solo/cimento - lote 07.....	100
FIGURA 27. Difratoograma do tijolo lote 6.....	104

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Processos de tratamento de resíduos.....	20
TABELA 2 - Centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil.....	27
TABELA 3 – Exigências químicas dos materiais pozolânicos.....	33
TABELA 4 - Exigências físicas dos materiais pozolânicos.....	33
TABELA 5 - Principais impurezas encontradas na água, seu estado e efeitos que causam.....	39
TABELA 6 - Componentes químicos inorgânicos do lodo de ETA que afetam a saúde humana.....	40
TABELA 7 - Características típicas de lodos de sulfato de alumínio.....	41
TABELA 8 - Propriedades físico-químicas de 17 tipos de lodo de ETAs.....	41
TABELA 9 - Composição química dos lodos de Eta's já caracterizados.....	49
TABELA 10 - Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado.....	58
TABELA 11 - Composição mássica dos tijolos.....	66
TABELA 12 - Características das cinzas de carvão.....	75
TABELA 13 - Resultados das massas específicas de cinzas de carvão.....	76

TABELA 14 - Análise da distribuição granulométrica das partículas para a cinza.....	77
TABELA 15- Composição química das cinzas leves de Carvão.....	78
TABELA 16 - Fases cristalinas identificadas nas cinzas de carvão.....	79
TABELA 17 - Atribuições das bandas do espectro Infravermelho das cinzas de carvão. T =Si ou Al e O =Oxigênio.....	82
TABELA 18 - Características do lodo de ETA.....	83
TABELA 19 - Resultado dos sólidos do lodo de ETA.....	84
TABELA 20 - Composição granulométrica do lodo de ETA.....	84
TABELA 21 - Resultados do Relatório final contendo os resultados da análise de sete lodos de ETA nomeados como L1 a L7 (ESCOLA SENAI MARIO AMATO,2006).....	85
TABELA 22 - Massas específicas de 06 tipos de lodo de ETA.....	86
TABELA 23 - Distribuição granulométrica do lodo de ETA.....	87
TABELA 24 - Composição granulométrica ideal para produtos da cerâmica vermelha, de acordo com o diagrama de Winkler.....	89
TABELA 25 - Composição química dos elementos principais presentes no lodo de ETA.....	91
TABELA 26 - Resistência à compressão dos tijolos.....	95
TABELA 27 - Absorção de água dos tijolos.....	96
TABELA 28 Características estéticas dos tijolos.....	102
TABELA 29. Caracterização Química do Tijolo lote 06.....	103

TABELA 30 – Fases cristalinas identificadas no tijolo lote 6.....	104
TABELA 31- Resultados das análises de Lixiviação (Comparados com Anexo F da NBR 10004).....	105
TABELA 32 - Resultados das análises de solubilização (Comparados com Anexo G da NBR 10004).....	105

## 1. INTRODUÇÃO

Todo processo industrial gera resíduos, muitas vezes tóxicos e perigosos, não sendo possível, simplesmente, descartar esses materiais na natureza sem causar danos à saúde e ao meio ambiente.

O conceito de desenvolvimento sustentável obriga a sociedade a ver em todo tipo de resíduo uma forma de desperdício, principalmente porque uma boa parte deles é gerada a partir de fontes não renováveis.

Uma das formas para a solução desse problema consiste na reciclagem ou na reutilização dos resíduos. A reciclagem e a reutilização de resíduos pela indústria vêm se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou reduzindo os custos.

Um dos resíduos sólidos mais significativos, em termos de volume, no Brasil, são as cinzas de carvão geradas em usinas termelétricas. A forma de acumulação dessas cinzas se dá numa decisão puramente econômica, sem considerar as relações com o meio ambiente, sendo dispostas de forma inadequada no entorno das usinas.

A disposição das cinzas em aterros oferece perigos potenciais aos mananciais hídricos, pois contaminam as águas superficiais e subterrâneas, e ao solo pela lixiviação dos seus elementos tóxicos (Depoi *et al.*, 2008). As principais aplicações das cinzas de carvão são na fabricação e incorporação ao cimento, mas isto ainda ocorre em pequena escala e somente para as cinzas leves.

Uma das maneiras de reduzir os impactos ambientais decorrentes da disposição das cinzas de carvão no meio ambiente consiste na ampliação das potencialidades de sua utilização (Fungaro *et al.* 2005).

Outro resíduo produzido em grande quantidade no Brasil é o lodo gerado em Estação de Tratamento de Água (ETA). Estima-se que, somente no Estado de S. Paulo, são gerados, aproximadamente, 30.000 toneladas/ano (Cosinet *al.*, 2004).

Os lodos das ETAs são dispostos, as vezes, nos corpos d'água mais próximos, sem nenhum tratamento, causando problemas ambientais, tais como: risco à vida aquática residente; aumento da quantidade de sólidos; assoreamento; mudanças de cor e turbidez; aumento das concentrações de

alumínio e ferro, além de, gradativamente, poder causar riscos à saúde pública, uma vez que os lodos concentram as impurezas presentes na água bruta.

Conforme a NBR – 10.004 (1989), os lodos gerados em ETAs são classificados como resíduos sólidos, devendo, portanto, ser devidamente tratados e dispostos sem que provoquem danos ao meio ambiente.

Devido ao exposto acima, a motivação desta pesquisa foi buscar uma possibilidade de utilização das cinzas de carvão e do lodo de ETA como matéria-prima na produção de tijolos prensados. O estudo envolve o desenvolvimento de processos capazes de fabricar produtos de valor agregado a partir de resíduos de forma a capacitá-los para o emprego em outras atividades. Assim, resíduos passarão a ser vistos como recursos que podem ser plenamente utilizados como requer o conceito de desenvolvimento sustentável.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o aproveitamento dos resíduos sólidos de usina termelétrica a carvão e de estação de tratamento de água na confecção de tijolos ecológicos. Pretende-se, com isso, contribuir com uma alternativa para a reciclagem destes resíduos e reduzir o impacto ambiental proveniente das duas atividades industriais promovendo o desenvolvimento sustentável.

## **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos traçados para atingir o objetivo principal do projeto de pesquisa estão relacionados abaixo:

1. Caracterização físico-química dos materiais usados na confecção de tijolos: cinzas de carvão e lodo de ETA.
2. Confecção dos tijolos.
3. Caracterização dos tijolos produzidos.
4. Avaliação da qualidade dos tijolos produzidos.
5. Avaliação do risco ambiental da incorporação das cinzas de carvão e do lodo de ETA nos tijolos.

## **3. REVISÃO DA LITERATURA**

### **3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS**

#### **3.1.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO**

Segundo a norma “NBR 10004:2004 – Resíduos Sólidos – Classificação” da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, resíduos sólidos são: resíduos nos estados sólidos e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviável em face à melhor tecnologia disponível.

A norma citada classifica os resíduos sólidos quanto aos seus potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente, mas não estão nela contemplados os resíduos radioativos que são de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

A classificação de resíduos, segundo a NBR 10004:2004, envolve a identificação do processo ou atividade que deu origem a eles e a seus constituintes, e características e a comparação desses constituintes com

listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

Os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- Resíduos Classe I – Perigosos
- Resíduos Classe II – Não perigosos, que, por sua vez, podem ser

subdivididos em:

- Classe II A – Não inertes
- Classe II B – Inertes

A classificação dos resíduos pode ser baseada exclusivamente na identificação do processo produtivo, quando do enquadramento do resíduo nas listagens dos anexos A ou B da NBR 10004:2004 ou por meio da verificação de suas características.

Um resíduo é enquadrado na Classe I se apresentar periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Dentre os critérios citados na norma para caracterizar um resíduo como tóxico, é comumente utilizada a comparação dos resultados obtidos no ensaio de lixiviação de resíduos descrito na NBR 10.005 (ABNT, 1995) com a Listagem nº 7 da NBR 10.004 (ABNT, 2004), em que constam os limites máximos de concentração para alguns poluentes. Se o extrato contiver qualquer um dos poluentes em concentrações superiores aos valores da listagem nº7, o resíduo será classificado como tóxico.

São enquadrados na Classe III – Inertes, os resíduos que, quando amostrados segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004) e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização da NBR 10.006 (ABNT, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme Listagem nº 8 da NBR 10.004 (ABNT, 2004), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Os Resíduos Classe II – Não-Inertes são aqueles que não se enquadram nas classificações de Resíduos Classe I – Perigosos, ou de Resíduos Classe III – Inertes, nos termos da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Esses resíduos podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Aboy (1999) realizou alguns ensaios recomendados pela NBR 10.004 (ABNT, 1987) para classificar os lodos de estações de tratamento de água e concluiu que os lodos de ETAs são Resíduos Sólidos Classe II.

A classificação de um resíduo, por si só, não deve impedir o estudo de alternativas para a sua utilização. No entanto, é essa classificação que orienta os cuidados especiais no gerenciamento do resíduo sólido, os quais podem inviabilizar sua utilização quando não se puder garantir segurança ao trabalhador, ao consumidor final ou ao meio ambiente (NBR 10.004, 2004).

### **3.1.2 GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS**

Segundo Silva e Fungaro (2011), todo processo industrial gera resíduos, muitas vezes tóxicos e perigosos, não sendo possível, simplesmente, descartar esses materiais na natureza sem causar danos à saúde e ao meio ambiente.

O gerenciamento adequado dos resíduos sólidos gerados nos processos industriais, assim como os demais gerados nas diversas atividades humanas, vem, nos últimos anos, ganhando grande espaço na “preocupação” das autoridades públicas e da sociedade como um todo.

Essa atenção tem contribuído para que toda a sociedade possa repensar seus padrões de consumo e comportamento. No grande encontro realizado no Rio de Janeiro em 1992, denominado Eco/92, foi gerado um documento denominado Agenda 21, no qual se destaca a necessidade de mudança dos padrões de produção e consumo, de forma que se tornem padrões sustentáveis. Destaca, também, a necessidade de integração da gestão dos resíduos à proteção ambiental. Foi definida a premente necessidade de minimização dos resíduos sólidos, desde a prevenção (redução da geração), até a reutilização e a reciclagem. A Agenda 21 estabeleceu, ainda, que é preciso se concentrar na redução, ao mínimo, da geração de resíduos; aumentar ao máximo a reutilização e reciclagem dos resíduos; a promoção da disposição e tratamento ambientalmente correto dos resíduos, e a ampliação dos serviços que se ocupam dos resíduos (Moreira, 2006).

Neste sentido, vem ocorrendo uma evolução na regulamentação do tema, que será objeto de descrição específica mais à frente, que obriga a todos

os atores sociais a se enquadrarem nesse novo panorama que se renova a cada dia. No caso das indústrias, as agências ambientais vêm exigindo delas um inventário dos resíduos gerados e informações completas sobre a destinação de cada um deles.

As exigências, cada vez mais crescentes quanto ao controle dos resíduos e a necessidade de manter a competitividade numa economia globalizada, vêm obrigando as indústrias a “enxergar” nos resíduos uma forma de desperdício e assim, a utilizar de forma mais racional os insumos de seus processos de modo a contribuir para a sustentabilidade de seus negócios (Moreira, 2006).

### **3.1.3 TECNOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO**

As tecnologias que vêm sendo desenvolvidas para tratamento e destinação dos resíduos sólidos são várias. Segundo Lange (2004), estas tecnologias visam os seguintes objetivos:

- Incorporação do resíduo em outro produto, incorporando energia e ou matéria-prima (co-processamento);
- Redução de seu volume (incineração);
- Processamento para reutilização no próprio processo gerador (calcinação);
- Processamento para reutilização em processo distinto do original (vários processos visando à reciclagem);
- Landfarming - (método de biorremediação que consiste na degradação biológica de resíduos em uma camada superior de solo);
- Disposição em aterro.

Segundo Lange (2004), as tecnologias podem usar processos físicos, químicos e ou biológicos, tais como:

- Físicos: Colunas de esgotamento de ar, adsorção em carvão ativo, centrifugação, diálise, destilação, eletrodialise, evaporação, filtração, floculação, flotação, troca iônica, destilação a vapor, adsorção em resinas, osmose reversa, sedimentação, coluna de esgotamento a vapor, etc.

- Químicos: Catálise, eletrólise, hidrólise, neutralização, oxidação, ozonólise, fotólise, precipitação, redução, etc.
- Biológicos: Lodo ativado, lagoas de aeração, digestão anaeróbia, compostagem, tratamento por enzimas, etc.

Na Tabela 1, são apresentados alguns exemplos de aplicação de diversas formas de tratamento.

TABELA 1. Processos de tratamento de resíduos

Metodologia	Exemplos de aplicação
Oxidação	Destruição de cianetos
Redução	Tratamento de Cr, Pb, Cd
Neutralização	Efluentes
Precipitação	Separação de óleos emulsificantes
Troca iônica	Concentração de contaminantes iônicos
Recuperação eletrolítica	Recuperação de metais em solução
Extração por solventes	Recuperação de metais em minérios
Flotação	Remoção de hidróxidos metálicos e carbonatos
Osmose reversa	Purificação de água para a indústria
Eletrodialise	Efluentes de tratamentos superficiais de metais como cromo; gravação em metais e galvanização
Ultrafiltração	Óleos de corte emulsificado; recuperação de tintas solúveis em água.

Fonte: Modificado de Lange, 2004

Segundo Tocchetto, (2000), as soluções para encaminhar adequadamente os problemas ambientais gerados pelos resíduos obedecem a uma sequência lógica e natural, expressa nas seguintes providências:

- a) minimização da geração de resíduos, através de modificações no processo produtivo, ou pela adoção de tecnologias limpas, mais modernas que permitam, em alguns casos, eliminar completamente a geração dos resíduos;
- b) reprocessamento dos resíduos gerados transformando-os novamente em matérias-primas ou utilizando para gerar energia;
- c) reutilização dos resíduos gerados por uma empresa, como matéria-prima para outra empresa;

- d) separação de substâncias tóxicas das não tóxicas, reduzindo o volume total de resíduos que devem ser tratados ou dispostos de forma controlada;
- e) processamento físico, químico ou biológico do resíduo, de forma a torná-lo menos perigoso ou até inerte, possibilitando sua utilização como material reciclável;
- f) incineração, com o correspondente tratamento dos gases gerados e a disposição adequada das cinzas resultantes;
- g) disposição dos resíduos em locais apropriados, projetados e monitorados de forma a assegurar que não venham no futuro, a contaminar o meio ambiente.

Também, segundo o autor, na sequência apresentada, as soluções decrescem em eficácia, pois partem de um conceito de eliminação do problema (o de evitar a geração do resíduo) e terminam na disposição controlada desse resíduo gerado (aterros industriais).

De outra forma, ainda segundo Tocchetto (2000), existem fatores que não são de ordem técnica, mas que afetam a escolha da solução:

- a) fatores econômicos: custo da tecnologia e dos investimentos necessários, valor dos materiais recuperados, comparação entre os custos de tratamento e de disposição final;
- b) fatores de imagem da empresa: soluções mais limpas, mesmo que sejam mais dispendiosas; decisão de não depender de aterros ou do processamento dos seus resíduos por terceiros;
- c) fatores legais e normativos: soluções proibidas regionalmente, por exemplo, o uso de incineradores ou o co-processamento de resíduos em fornos de cimento, o cumprimento de exigências para a certificação e licenciamento;
- d) fatores relacionados com os riscos na empresa: redução dos prêmios de seguro através da adoção de soluções seguras, menor incidência de acidentes pessoais e de contaminação de funcionários.

### **3.1.4 PREVENÇÃO, REDUÇÃO, REUSO E RECICLAGEM**

Segundo a agência ambiental americana Environment Protection Agency (EPA), antes de se pensar em solução de disposição, os resíduos têm que ser administrados seguindo a seguinte lógica:

Prevenção – evitar a sua geração;

- Redução – gerar o mínimo possível;
- Reuso – reutilizá-lo no próprio processo que o gerou ou em outro processo, mas sem alteração de suas propriedades físico-químicas;
- Reciclagem – transformá-lo de forma a servir de matéria-prima para outro processo distinto daquele que o originou.

Entretanto, em muitas organizações o gerenciamento ambiental ainda está focado no controle da poluição, em que técnicas de tratamento dos resíduos ou emissões já geradas pelo processo produtivo são empregadas. Além de se tratar de técnicas caras, este enfoque permite ainda o desperdício de materiais, insumos e recursos naturais, não sendo, então, baseado no princípio do desenvolvimento sustentável.

Em vista disto, novas metodologias de gerenciamento ambiental vêm sendo mundialmente empregadas com o objetivo de se evitar ou mesmo minimizar a geração da poluição, sendo, portanto “ferramentas” preventivas.

### **3.1.5 A LEGISLAÇÃO ATUAL**

A Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

A Resolução nº 313, estabelecida pelo CONAMA em 29 de outubro de 2002, dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais, e determinou que os órgãos estaduais providenciassem e apresentassem ao IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, no prazo de dois anos, um inventário estadual. Determinou, ainda, que o IBAMA e os órgãos estaduais elaborassem, em até três anos, no âmbito de suas competências, os programas estaduais de gerenciamento de resíduos

industriais e, em até quatro anos, o Plano Nacional de Gerenciamento de Resíduos Industriais.

“Há também, além da legislação, uma série de normas técnicas que tratam do tema ‘resíduos sólidos”. A ABNT editou, em 1987, e revisou em 2004, um conjunto de normas técnicas visando padronizar a amostragem, os ensaios e a classificação dos resíduos sólidos. São elas:

- NBR 10004:2004 - Resíduos Sólidos - Classificação
- NBR 10005:2004 - Lixiviação de Resíduos - Procedimento
- NBR 10006:2004 - Solubilização de Resíduos - Procedimento
- NBR 10007:2004 - Amostragem de Resíduos – Procedimento

A busca de “conceitos modernos de gestão dos resíduos sólidos” (Instituto Brasileiro de Administração Municipal IBAM, 1995) que apontem para a “redução na fonte, reaproveitamento, reciclagem e participação comunitária”, não poderá significar a dedicação dos técnicos, administradores e legisladores apenas a bandeiras como a da coleta seletiva de embalagens recicláveis e outros produtos contidos nos resíduos domiciliares.

## **3.2 CINZAS DE CARVÃO**

### **3.1.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS**

A formação das cinzas se dá pela combustão direta do carvão fóssil, que é uma matéria-prima sólida, constituída por duas frações intimamente misturadas, uma orgânica (matéria volátil e carbono fixo) e uma fração mineral (argilas, quartzo, piritas, carbonatos, etc.). Pela ação do calor, a fração orgânica gera voláteis e coque, enquanto a fração mineral se transforma em cinza com uma mineralogia modificada, tendo em vista, a perda de água das argilas, decomposição dos carbonatos, oxidação dos sulfetos, etc. (Rohde et al., 2006).

As cinzas são formadas a partir de componentes não combustíveis do carvão e, também, de partículas não queimadas devido à combustão incompleta do carvão pulverizado na câmara de combustão, em temperatura variável entre 1200 e 1600°C (Pozzobon, 1999). O carvão mineral produzido e utilizado no Brasil como combustível contém altos teores de matéria mineral

(até 60%) responsável pela geração dos resíduos em grande quantidade (Silva *et al.* 1997).

As características físicas e químicas das cinzas de carvão variam de acordo com as características do mineral natural que as originou (carvão mineral), com o tipo de queima do carvão, projeto e operação da caldeira, grau de beneficiamento e moagem do carvão, sistema de extração e manuseio (Adriano *et al.*, 1980). Portanto, é difícil ter uma previsão precisa de suas características.

De modo geral, cinzas de carvão são minerais aluminos silicatos constituídos pelas fases amorfa e cristalina. Constituem-se de um pó de grãos finos com propriedades pozolânicas, composto principalmente por partículas vítreas e esféricas (Querol *et al.*, 2002).

Na queima do carvão são gerados os seguintes tipos de cinzas (Rohde *et al.*, 2006):

- Cinza leve (cinza volante ou cinza seca) – constituída por partículas extremamente finas (100% com dimensão inferior a 0,15mm), transportada pelo fluxo dos gases da combustão, coletada nos ciclones mecânicos ou precipitadores eletrostáticos ou, ainda, lançada na atmosfera;
- Cinza pesada (cinza úmida) – é mais pesada e de granulometria mais grossa que a cinza leve, caindo no fundo das fornalhas e gaseificadores, sendo frequentemente retirada por um fluxo de água; e
- Escória (cinza grossa) – é a cinza originada na queima ou gaseificação do carvão granulado em grelhas móveis. Retirada pelo fundo da fornalha após ser resfriada com água. Frequentemente, apresenta granulometria grosseira e blocos sinterizados, tendo teores de carbono não queimado entre 10 e 20%.

Os elementos predominantes das cinzas são Al, Si, O, Fe, Ca, K e Na. Elementos traços como As, B, Ca, Mo, S e Se podem ser encontrados nas partículas menores. O pH das cinzas varia de 4,5 a 12 dependendo das características geoquímicas do carvão precursor (Ferret, 2004).

As cinzas volantes são compostas entre 60 e 90% de material vítreo, sendo geralmente 30 a 60% de  $\text{SiO}_2$ , 10 a 20% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 5 a 10% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 5 a 10% de  $\text{MgO}$  e 2 a 4% de  $\text{CaO}$ , entre outros compostos. (Ferret, 2004).

Mehta e Monteiro (1994) mostraram, por evidência microscópica, que a maior parte das partículas nas cinzas volante ocorre como esferas sólidas de vidro, mas, às vezes, pode estar presente um pequeno número de esferas ocas, chamadas cenosferas (completamente vazias) e plerosferas (preenchidas com muitas esferas pequenas) conforme mostra a Figura 1.

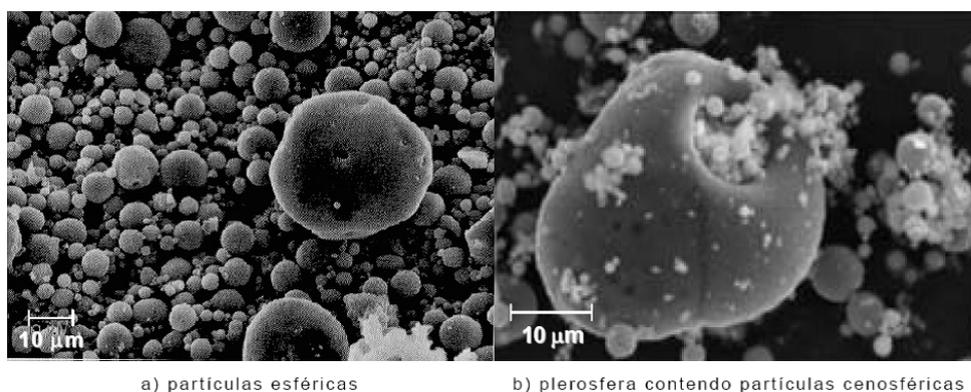


Figura 1. Cinzas Volantes (Azevedo, 2002)

O conhecimento das propriedades dos carvões e de suas cinzas é um parâmetro importante para decidir o seu uso industrial, planejar o local dos depósitos dos resíduos gerados não utilizados, para evitar a contaminação da água e do solo e mitigar outros impactos ambientais (Levandowski e Kalkreuth, 2009).

As características gerais e possibilidades de uso das cinzas de carvão fóssil no Brasil estão discutidas no livro de Rohde et al., 2006.

Depoi *et al.*, 2008 estudaram as características química dos carvões e das cinzas leve e pesada de todas as usinas termelétricas brasileiras (Figueira/PR, Jorge Lacerda/SC, Presidente Médici/RS, São Jerônimo/RS e Charqueadas/RS). As concentrações média dos elementos traço dos carvões brasileiros (principalmente As, Se, Pb, Cd, Hg e Tl), com exceção de Figueira, foram similares ou menores do que a média para os carvões de outros países. As concentrações de As, Cd, Mo, Pb, Tl, U, Zn, e Hg eram relativamente maiores nas cinzas leves e pesadas de Figueira.

Os estudos também demonstraram que os carvões brasileiros são mais ricos em cinzas e mais pobre em carbono quando comparados com os carvões de outras partes do mundo.

Levandowski e Kalkreuth, 2009 estudaram as características químicas e petrográfica do carvão e as características químicas das cinzas leves e pesadas da usina termelétrica de Figueira. A análise de refletância da vitrinite mostrou que o carvão é do tipo betuminoso alto volátil B/C e é caracterizado por grupo de macerais de vitrinite. A análise química dos principais elementos do carvão, das cinzas leve e pesada indicou alto conteúdo de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

As cinzas brasileiras não possuem legislação específica, sendo classificadas, em sua maioria, como "resíduo Classe II - A - não inerte", devendo, assim, ser encaminhadas para aterro sanitário quando a alternativa de reciclagem tiver sido descartada (Rohde *et al.*, 2006).

De acordo com Pozzobon (1999), de um modo geral, nas análises realizadas com a cinza produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, os resultados de lixiviação não ultrapassaram os limites prescritos de material perigoso, classificando como resíduo não perigoso, segundo a NBR 10.005. O teste de solubilização, segundo a NBR 10.006, indicou alguns parâmetros acima dos padrões de potabilidade da água, enquadrando esta cinza na classe dos resíduos não inertes, classificação da maior parte das cinzas de carvão mineral.

Estima-se que a produção mundial de cinzas de carvão atinja, na atualidade, cerca de 500 milhões de toneladas/ano, das quais apenas cerca de 20% são aproveitadas.

Silva *et al.* (1997) relataram que a demanda mundial de carvão, até o ano de 2020, será crescente e, provavelmente, duplicará. As razões deste crescimento são a abundância e facilidade de extração do carvão, bem como, o domínio da tecnologia da queima do carvão, além da falta de outras fontes de energia que possam substituir o carvão de forma econômica. Em razão desse aumento no consumo do carvão para geração de energia também haverá um crescimento na produção de cinzas.

Segundo Kreuz (2002), no Brasil, a tendência no consumo de carvão para a produção de energia elétrica é crescente devido à demanda da sociedade. A participação do carvão mineral na geração de energia do país irá aumentar de 1,6% para 2,7% até 2030 segundo o Plano Nacional de Energia Elétrica 2030. Um fator que estimula o uso desse tipo de energia está na constância no fornecimento da mesma, já que não depende das condições climáticas, como é o caso das hidroelétricas.

O Brasil possui sete usinas termelétricas a carvão em operação, localizadas na região Sul do País, e totalizaram 1.905 MW de potência instalada em 2008 (Tabela 2). A geração de cinzas de carvão é estimada entre 3 a 4 milhões de toneladas ao ano, sendo a produção de cinzas volantes entre 65 e 85% e entre 15 e 35% para as cinzas pesadas (Levandowski e Kalkreuth, 2009).

TABELA 2. Centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil

<b>Usina</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Município – UF</b>
Charqueadas	72000	Charqueadas – RS
Figueira	160250	Figueira – PR
Jorge Lacerda I e II	232000	Capivari de Baixo – SC
Jorge Lacerda III	262000	Capivari de Baixo – SC
Jorge Lacerda IV	363000	Capivari de Baixo – SC
Presidente Médici A/B/C	796.000	Candiota – RS
São Jerônimo	20000	São Jerônimo – RS

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2008

As cinzas de carvão têm sido dispostas, historicamente, no sul do Brasil, como depósitos (“bota-fora”) nas cercanias das fontes geradoras (Figura 2). Tal panorama começou a mudar a partir da década de 1990, por pressão da sociedade e ações de órgãos ambientais e governamentais.



Figura 2. Depósito de cinzas de carvão ao redor de usina termelétrica. Foto :  
Dra. Denise Fungaro

A principal aplicação das cinzas de carvão é a comercialização para o setor de construção, mas isto ainda ocorre em apenas algumas centrais termelétricas do Brasil e somente com as cinzas leves (~ 34 % das cinzas gerada). O excedente tem como destino final, além dos depósitos, as bacias de decantação (chamadas cinza de lagoa) e cavas de mina exauridas.

O pequeno nível de consumo das cinzas de carvão é inevitável devido à combinação de custos altos de transporte com produto de relativamente baixo valor relativo no mercado.

As cinzas de carvão se forem dispostas de maneira inadequada a céu aberto podem causar grande impacto ambiental no solo e nas águas subterrâneas e superficiais devido à lixiviação de elementos tóxicos presentes em sua composição, principalmente As, Cd, Mo, Pb, Tl, U, Zn e Hg conforme atestou o estudo de Depoi *et al.*, 2008. Portanto, devem-se ter critérios para sua disposição, por exemplo, escolher uma área em que não ocorram inundações, impermeabilizar o solo, o aterro deve ser localizado a uma distância mínima de qualquer curso d' água, a arborização deve ser adequada nas redondezas para evitar o espalhamento das cinzas.

Alternativamente, as cinzas de carvão podem ser vistas como um recurso inexplorado com grande potencial. Há, portanto, interesse na expansão de outras vias para a exploração comercial de cinzas de carvão, particularmente como um substituto para outros recursos.

Do ponto de vista de geração de energia elétrica, as cinzas de carvão são consideradas resíduos, porém, ao avaliar suas características e possibilidades de uso, estas podem ser consideradas como um recurso, ou seja, um sub-produto da combustão a ser amplamente utilizadas e exploradas (Wang e Wu, 2006).

O armazenamento das cinzas de carvão a seco tem como vantagem principal, que suas propriedades físico-químicas permanecem inalteradas, o que constitui uma reserva para futura utilização (Umaña-Peña, 2002).

### 3.2.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS

A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Dessa forma, em compostos a base de cimento Portland, o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos, reage com a pozolana, utilizada como substituição parcial do cimento, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, que são produtos mais estáveis do cimento hidratado, Oliveira e Barbosa (2006).

As pozolanas são normalmente utilizadas de duas formas: como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume do cimento, conforme (Silveira, 1996) apud Santos (2006). Porém, independentemente de como a pozolana é utilizada, a reação pozolânica e os benefícios associados são os mesmos (Mehta, 1987). Porém, deve-se considerar que cada material possui suas características próprias, o que proporciona resultados (valores) diferentes.

Segundo a NBR 12653 (1994), materiais pozolânicos são “materiais silicosos ou silico aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

Os materiais pozolânicos podem ser divididos em naturais e artificiais (NBR 12653/1992; Montanheiro *et al.*, 2002; entre outros). Pozolanas naturais são aquelas cuja origem é vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO<sub>2</sub>) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Já as pozolanas artificiais são materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico com atividade pozolânica (NBR 12653/1992), e podem ser divididas em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais.

No caso das pozolanas naturais, por serem definidas como sendo materiais de origem vulcânica ou sedimentar com atividade pozolânica, sua abrangência, segundo Montanheiro *et al.* (2002), dá margem a controvérsias quanto à classificação de certos tipos de pozolanas, como das argilas

calcinadas que, segundo alguns autores, são dadas como naturais e, segundo outros, como artificiais. O ponto crucial da questão está em classificar uma rocha cujas propriedades pozolânicas são realçadas com o tratamento térmico. Malquori (1960), Massaza (1976), ABNT (1992) e Kitsopoulos e Dunham (1996), apud Montanheiro et al. (2002), entre outros, classificam como pozolanas naturais todas as rochas portadoras de atividade pozolânica natural. Por outro lado, Mielenz *et al.* (1951), Mehta (1987) e Acl (1994), apud Montanheiro *et al.*(2002), entre outros autores, admitem como pozolanas naturais também os produtos da calcinação dessas rochas.

Sendo assim, no âmbito deste trabalho, foi adotado o que define a NBR 12653/1992, que considera as argilas calcinadas como pozolanas artificiais. Apesar disso, independente de sua classificação, existe um consenso quanto a sua definição, que segundo a mesma NBR, são materiais provenientes da calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500 °C e 900 °C, de modo a garantir a sua reatividade com o hidróxido de cálcio.

Já as cinzas volantes, definidas como pozolanas artificiais, são materiais finamente divididos que resultam da combustão de carvão pulverizado ou granulado com atividade pozolânica (NBR 12653/1992). Ainda, de acordo com a mesma norma, “outros materiais” são as pozolanas não tradicionais, tais como: escória siderúrgica ácidas, cinzas de materiais vegetais, rejeito de carvão mineral.

Segundo Cheriaf *et al.* (1999), uma amostra de cinza pesada, oriunda da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, foi submetida ao ensaio de reatividade pozolânica com cal. Os índices de atividade foram maiores que os prescritos pela norma, chegando a conclusão que a cinza pesada é apropriada para ser usada em concreto. Eles concluíram que a moagem da cinza pesada melhora a sua reação pozolânica, já que a índice de atividade pozolânica aumentou 27% quando a cinza pesada foi moída por 6h, além do que a relação água/cimento reduziu de 0,62 para 0,57.

Ranganath *et al.* (1998) examinaram a reação com cal de diferentes cinzas oriundas de lagoas de decantação (compostas por cinza pesada e cinza volante), separadas em 3 frações com tamanhos de partículas: fração F (com tamanhos < 20 µm); fração M (tamanhos entre 20 µm e 75 µm) e fração C

(tamanhos entre 75  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ ). Os autores avaliaram as características físicas, químicas e mineralógicas das partículas, bem como a reatividade com cal das diferentes frações. Através disso os autores concluíram que a presença de partículas maior de 75- $\mu\text{m}$  nas bacias afeta negativamente as características físicas das cinzas para o presente uso. Os autores aconselham fazer uma retirada das partículas não reativas e de grande tamanho utilizadas na produção de cimentos, como também não misturar cinzas volantes coletadas nos precipitadores eletrostáticos com as pesadas quando se pretende usá-las como pozolana.

Taylor e Kruger (1997) confeccionaram concretos de referência e concretos com diversas frações de cinza volante na proporção de 60:40 (cimento:cinza leve), objetivando determinar o efeito do uso de cinza leve com diferentes tamanhos de partículas no material cimentante. Na separação da cinza pesada foram usados 3 tamanhos de peneira com abertura de malha de 20  $\mu\text{m}$ , 45  $\mu\text{m}$  e 75  $\mu\text{m}$ , sendo que as peneiras foram usadas separadamente, a fim de peneirar as partículas em tamanhos maiores e menores de: 20 $\mu\text{m}$ ; 45 $\mu\text{m}$  e 75  $\mu\text{m}$ . Os melhores resultados para esse ensaio foram para os concretos contendo cinza volante com maior finura, sendo que as partículas de grande tamanho não contribuíram significativamente para o processo de hidratação.

Malhotra e Mehta (1996) classificam a cinza pesada como uma adição mineral ao concreto, de fraca ação pozolânica.

Segundo Gava (1999), diante da grande disponibilidade de materiais pozolânicos, aliada às novas exigências de materiais de construção que atenda o quádruplo enfoque, iniciado pela letra E, apontados por Mehta e Monteiro (1994): “Engenharia, Economia, Energia, Ecologia, o aumento na incorporação de subprodutos industriais que apresentem características pozolânicas torna-se de fundamental importância. Assim, há a necessidade de desenvolvimento de normalizações menos prescritivas e principalmente de metodologias de ensaios que avaliem o real desempenho das pozolanas quando adicionadas a concretos e argamassas”.

A pozolanidade das cinzas está intimamente relacionada com o teor de  $\text{SiO}_2$ , visto ser a sílica amorfa que se combina com a cal livre e a água dando origem à formação de quantidades suplementares de C-S-H. Segundo Alonso

e Wesche (1991) apud Azevedo (2002), cinzas com conteúdos de  $\text{SiO}_2$  inferiores a 35% são praticamente inativas como pozolanas e não devem ser incorporadas no concreto. Com opinião contrária encontram-se Halstead (1986), Mehta (1985), Joshi e Lohtia (1997), que consideram que em termos de composição química, com exceção do teor de cálcio, a variação dos constituintes das cinzas volantes influencia, aparentemente, de forma marginal as suas propriedades pozolânicas ou cimentícias. Alonso e Wesche (1991) apud Azevedo (2002) indicam, também, que cinzas volantes com elevado teor de cal (15% a 40%) podem ser dotadas de propriedades aglomerantes e hidráulicas e que a sua inclusão em concretos deve ser evitada.

### **3.2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS POZOLANAS**

A NBR 12653/1992 classifica os materiais pozolânicos segundo três classes (Classe N, Classe C e Classe E). Essa classificação é em função da sua origem, requisitos químicos e físicos estabelecidos nesta mesma Norma.

Os materiais pozolânicos da Classe N são as pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis na NBR 12653/1992, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico, ácido “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Os da Classe C são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedecem também aos requisitos aplicáveis nesta NBR. Por último o material da Classe E é qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na mesma NBR(NBR 12653/1992).

Ainda, segundo a mesma NBR, os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas estabelecidas respectivamente nas Tabelas 3 e 4.

TABELA 3. Exigências químicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	C	N	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín.	70	70	50
SO <sub>3</sub> , % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653/1992

TABELA 4. Exigências físicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	C	N	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	3	4	5
com o cal aos 7 dias, em Mpa	6	6	6
água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: NBR 12653/1992

### 3.2.4 UTILIZAÇÕES DAS CINZAS DE CARVÃO

Apesar da cinza pesada e da cinza leve serem geradas em grandes quantidades, a maioria dos estudos é realizada sobre a utilização das cinzas leve, enquanto que com as cinzas pesadas praticamente não são realizados estudos e seu aproveitamento é bastante reduzido. O enfoque sobre as cinzas volantes deve-se às características físicas e a sua forma de estocagem em silos. Assim, com um mínimo de beneficiamento, o material está pronto para substituição de parte do cimento Portland. Em contra partida, a cinza pesada para ser utilizada com o mesmo objetivo deve ser submetida a uma moagem e secagem prévia, o que encarece o produto (Kreuz, 2002).

Outras aplicações das cinzas de carvão relatadas em literatura são:

- Extração de metais de interesse como: Al, Si, Fe, Ge, Ga, V, Ni (Lakshmanan 1986 e 1990, Rayzman, *et al.*, 1997);
- Extração de carbono não queimado (Hamley, 2001);
- Adsorventes para gases de combustão (Tsuchiai *et al.*, 1995; Karatepe, *et al.*, 1997);
- Produtos cerâmicos especiais (Ozdemir, 2001) e painéis anti-incêndio (Vilches *et al.*, 2002);
- Condicionamento de solos (Martins, 2001); controle de erosão (Tishmack *et al.*, 2001) e solos artificiais – Slash (Reynolds, 1999);
- Síntese de zeólitas (Fungaro e Silva, 2002; Fungaro e Izidoro, 2004, 2006a, 2006b, 2008; Fungaro, 2004, 2006; Fungaro *et al.*, 2004, 2005; 2009a, 2009b; 2009c; Izidoro e Fungaro, 2007; Fungaro e Graciano, 2007; Izidoro, 2008; Bruno, 2008; Fungaro e Bruno, 2009a, 2009b; Carvalho *et al.*, 2010. Carvalho, 2010, Magdalena, 2010).

As propriedades das cinzas leve de carvão e suas utilizações estão relatadas em artigos de revisão de Ahmaruzzaman (2009).

No seu trabalho, Kreuz (2002), realizou um estudo em concretos com diferentes consumos de cimento, diferentes quantidades de substituição de agregados naturais por cinza pesada, diferentes quantidades de substituição do cimento por cinza pesada em dosagens com diferentes tipos de cimentos Portland. Através dos resultados obtidos das curvas de dosagens pode-se observar, nos concretos com incorporação de cinza pesada em relação aos concretos de referência, uma redução significativa no consumo de cimento para a obtenção de concretos com as mesmas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

### **3.3 LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

#### **3.3.1 PROCESSOS CONVENCIONAIS DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

A maioria das Estações de Tratamento de Água (ETAs) utiliza o processo convencional para tratamento em função de as águas brutas apresentarem elevados graus de turbidez e cor, com a presença de matérias coloidais.

O processo convencional é constituído das seguintes etapas: aeração, eliminação de impurezas grosseiras, pré-cloração, controle de vazão, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação (Figura 3).

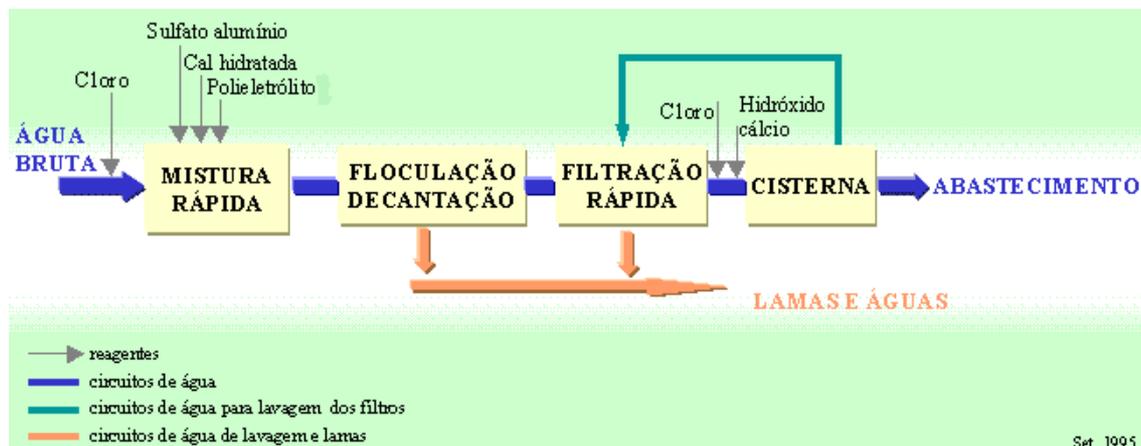


Figura 3. Etapas do processo convencional da ETA

Os resíduos que serão removidos por sedimentação e filtração, principalmente nos decantadores, são denominados lodo de ETA, conforme mostra a Figura 4 (Tsutiya e Hirata, 2001).



Figura 4. Lodo de ETA no decantador. Fonte: Cordeiro (2001).

A coagulação é a desestabilização de colóides ou partículas coloidais, com diâmetro entre 0,1 e 0,001  $\mu\text{m}$ . Os principais coagulantes usados são: sulfato de alumínio, policloreto de alumínio, sulfato férrico, sulfato ferroso clorado e cloreto férrico (Teixeira et. al. 2006).

Segundo Richter e Azevedo (2003), os termos coagulação e floculação são usados frequentemente como sinônimos, significando o processo integral de aglomeração de partículas. Entretanto, é na mistura rápida que ocorre a dispersão do coagulante na água, um processo de aglutinação e precipitação que reduz as forças de repulsão, a qual tende a manter separadas as

partículas em suspensão. Para que a dispersão do coagulante na água seja a mais homogênea possível, é comum o uso do dispositivo hidráulico denominado *Calha Parshall* que, além de proporcionar a mistura rápida, possibilita a medição da vazão afluente, condicionando a adição líquida precisa de coagulante por  $\text{m}^3$  de água a ser tratada (Hudson e Wolfner, 1967), citado por Guerra (2005).

Os fenômenos envolvidos no processo de coagulação são: o químico e o físico. O químico está presente nas reações com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, que dependem da concentração do metal e do pH final da mistura. O físico influi no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes na água. Esse processo tem como finalidade melhorar a remoção de substâncias coloidais dissolvidas na água. São vários os coagulantes químicos utilizados nas estações de tratamento de água a base de sais de alumínio e ferro, como exemplo, o sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ), o cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), o sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) e o sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ).

No mercado, foi lançado o Policloreto de Alumínio (PAC) que é um coagulante inorgânico, catiônico e pré-polimerizado. Esse coagulante possui cadeias de polímeros pré-formadas, exibindo uma alta concentração de carga catiônica na unidade polimérica. A velocidade de formação dos flocos é superior aos coagulantes tradicionais, não pré-polimerizados, garantindo aos flocos maior peso e conseqüente precipitação mais rápida e eficiente (Sens et al., 2006).

A fase de floculação tem a função de promover a aglomeração de partículas desestabilizadas de tamanho coloidal, de forma a induzir movimentos causados pelo gradiente de velocidade gerado e pelo floculador hidráulico ou mecânico, Richter e Azevedo, (2003). Na coagulação, as forças primárias são de natureza eletrostática, já na floculação as ações das partículas desestabilizadas formam pontes químicas, resultantes das forças de Van der Waals. Macroscopicamente a floculação transforma as partículas coaguladas de tamanho sub-microscópico em tamanhos visíveis, para que a remoção seja realizada por ação da gravidade, principalmente na fase de decantação, seja pelo seu pequeno tamanho ou por sua densidade ser próxima

a da água, sua remoção deverá ser realizada na fase de filtração (Richter e Azevedo, 2003).

A filtração é um processo de separação sólido-líquido, que envolve fenômenos físicos, químicos e, às vezes, biológicos, pois, buscam retirar impurezas presentes na água pela passagem em meio poroso. Os maiores problemas no meio filtrante são decorrentes da saturação de conglomerados que induzem a paralisação do processo para lavagem de filtros, onde são gerados sólidos diluídos chamados de “águas de lavagem de filtros” (Richter e Azevedo, 2003).

### **3.3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO LODO DE ETA**

Segundo a American Water Works Association (AWWA), United States Environmental Protection Agency (EPA), American Society of Civil Engineers (ASCE), (1996), as características físico-químicas do lodo estão relacionadas com a operação da ETA e às características de sazonalidade da água bruta. Nos períodos de chuvas os parâmetros de controle como turbidez, cor e outros apresentam elevados valores e, em consequência, são utilizadas maiores dosagens de coagulantes. E, o contrário, ocorre durante o período de estiagem.

De acordo com Hoppen *et al.* (2006), o lodo representa, em volume, entre 0,3 a 1% da água tratada. A quantidade de lodo dos decantadores representa cerca de 60 a 95% da quantidade total de resíduos produzidos na ETA, e o restante é oriundo do processo de filtração.

Estudos de Cordeiro (1999), Cornwell (1999), Andreoli (2001), Tsutiya e Hirata (2001) apontaram que a maioria das ETAs que utilizam sulfato de alumínio  $[Al_2(SO_4)_3]$  ou cloreto férrico ( $FeCl_3$ ) como coagulantes e usam o processo convencional produzem, como subprodutos do tratamento, os lodos dos decantadores e das águas de lavagem dos filtros com a presença de carvão ativado em pó, cal e polímeros. Estes autores afirmaram que as características quantitativas e qualitativas do lodo são resultado da qualidade da água bruta, dos produtos químicos utilizados no tratamento, das condições de operação de cada unidade e do tempo de permanência do lodo nos decantadores.

Para Silva Junior e Isaac (2002), o lodo de ETA é caracterizado como um fluído não newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se em estado gel, quando em repouso e, relativamente líquido, quando agitado.

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), o lodo de ETA é classificado como resíduo sólido Classe II A – não inerte, que pode ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e, por isso, deve ser descartado, de acordo com as leis ambientais vigentes, o que foi confirmado por Aboy (1999) em ensaios realizados nos lodos de ETAs de Porto Alegre (RS).

Segundo Grandin *et al.* (1993), Richter (2001), Fortes *et al.* (2008), o lodo de ETA apresenta de 95 a 99,5% de água e de 0,5 a 5% de sólidos, constituído, basicamente, de resíduos de sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, tais como: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areias, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, etc. Junto com esses constituintes, estão presentes os hidróxidos de alumínio em grande quantidade provenientes da adição de produtos químicos e, em alguns casos, polímeros condicionantes utilizados no processo. Assim, por razões técnicas e ambientais, necessitam ser adequadamente tratados para a redução de volume e as alternativas de disposição final desse resíduo (Silva Junior *et al.*, 2000).

Na Tabela 5 estão representados os principais resíduos, o modo como são encontrados e os seus efeitos nas fontes de água (Leme, 1990).

TABELA 5. Principais impurezas encontradas na água, seu estado e efeitos que causam

IMPUREZAS	ESTADO	EFEITOS
Areia, silte e argila	Suspensão	Doenças e prejuízos às instalações
Bactérias	Suspensão	Poluição
Resíduos domésticos e industriais	Suspensão	Cor, sabor e acidez
Corantes vegetais	Coloidal	Turbidez
Sílica	Coloidal	Alcalinidade
Carbonato e bicarbonato de Ca e Mg	Dissolvidos	Alcalinidade e dureza
Sulfatos e Ca e Mg	Dissolvidos	Dureza
Cloretos e Ca e Mg	Dissolvidos	Dureza e corrosividade
Carbonato e bicarbonato de Na	Dissolvidos	Alcalinidade
Sulfato de Na	Dissolvidos	Ação laxativa
Fluoretos de Ca	Dissolvidos	Ação sobre os dentes
Cloretos de Ca	Dissolvidos	Sabor
Ferro	Dissolvidos	Sabor e cor
Manganês	Dissolvidos	Cor
Oxigênio	Dissolvidos	Corrosividade
Dióxido de Carbono	Dissolvidos	Acidez e corrosividade
Nitrogênio	Dissolvidos	Nulo

Fonte: Leme (1990).

As características dos lodos podem variar também em função da tecnologia usada no tratamento de água (Saron e Leite, 2001), Cordeiro (2000) acredita que para o lodo de ETA, além dos parâmetros tradicionais do saneamento, devem ser considerados, também, a concentração, o tipo e o tamanho das partículas.

De acordo com a AWWA, o lodo de ETA possui uma característica mais similar aos solos do que se comparado com o lodo de esgoto. Nesse caso, em geral, o nitrogênio e o carbono orgânico no lodo de ETA são mais estáveis, menos reativos e em menores concentrações.

Para a United States Environmental Protection Agency (EPA), American Society of Civil Engineers (ASCE), AWWA/EPA/ASCE (1996), Cordeiro (1999) e Scalize (2003), os parâmetros que definem a caracterização física do lodo de ETA são: concentração de sólidos, resistência específica, compressividade, densidade, tamanho e distribuição das partículas, turbidez, cor,

sedimentabilidade e viscosidade. Para esses autores os parâmetros que definem a caracterização química do lodo de ETA são metais e elementos tóxicos. Os problemas de sabor na água derivam, em parte, dos sais, sólidos totais dissolvidos (STD) e da presença de metais como Fe, Cu, Mn e Zn.

O potencial tóxico dos resíduos de ETAs depende, principalmente, do teor de metais presentes, além das características físico-químicas e das condições em que estes resíduos são dispostos. Outros fatores que também influenciam a toxicidade são as reações sofridas durante o processo, forma e tempo de retenção, características do curso d'água, composição e impureza dos coagulantes e outros produtos químicos utilizados no tratamento da água (Barroso e Cordeiro, 2001).

Barroso e Cordeiro (2001) descreveram que alguns metais, como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo e magnésio e, em especial, o alumínio presente no lodo de ETA possuem ações tóxicas, podendo apresentar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, disposição final e, até mesmo, na reutilização desses resíduos.

Na Tabela 6 estão apresentadas as características químicas e valores máximos permissíveis dos elementos contidos no lodo de ETA, considerando-se os grupos dos componentes inorgânicos que afetam a saúde do ser humano (Di Bernardo *et al.* (1999).

TABELA 6. Componentes químicos inorgânicos do lodo de ETA que afetam a saúde humana

Características	Valor máximo permissível (VMP) ou faixa de valores
Arsênio (mg/L)	0,01
Bário (mg/L)	0,7
Cádmio (mg/L)	0,005
Chumbo (mg/L)	0,01
Cianetos (mg/L)	0,07
Cromo Total (mg/L)	0,05
Fluoretos (mg/L F)	1,5
Mercúrio (mg/L)	0,001
Nitratos (mg/L N)	10
Prata (mg/L)	0,05
Selênio (mg/L)	0,01

Fonte: Di Bernardo *et al.* (1999) atualizado pela NBR 10.004/2004.

O teor de sólidos totais do lodo de ETA varia entre 1.000 a 40.000 mg/L (0,1 a 4%), sendo deste, de 75 a 90% sólidos suspensos e 20 a 35% compostos voláteis, apresentando. Portanto, uma pequena porção biodegradável, mas que pode ser prontamente oxidável. A massa específica varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes nesse, ela pode variar de 1,002 kg/m<sup>3</sup> para lodos com teor de sólidos de 1%, até 1,5 kg/m<sup>3</sup> após processo de desidratação (Richter, 2001).

Segundo Richter (2001), o lodo proveniente do sulfato de alumínio apresenta uma pequena proporção de biodegradabilidade e suas principais características são apresentadas na Tabela 7.

TABELA 7. Características típicas de lodos de sulfato de alumínio

Sólidos Totais (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O (%)	Inorgânicos (%)	Matéria Orgânica (%)	pH	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
0,1 – 4	15 - 40	35 - 70	15 – 25	6 - 8	30 – 300	30 – 5.000

Fonte: Richter (2001)

Na Tabela 8, encontram-se as principais características de dezessete amostras de lodo de ETA relatadas em literatura.

TABELA 8. Propriedades físico-químicas de 17 tipos de lodo de ETAs

Valores de Referência	pH	Condutividade dS/m	CTC cmol/kg	COT	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Teor de água disponível para plantas g/kg
Lodo de ETA	5,3 a 7,8	0,22 a 1,1	13,6 a 56,5	17 a 149	0,56 a 1,3	26 a 416
Valores Médios	7,1	0,5	30	63	0,9	139
Solos Típicos	5,0 a 8,0	< 0,4	3,5 a 35,6	< 30	1,0 a 1,55	63 a 300

Fonte: Dayton e Basta (2001); CTC= capacidade de troca catiônica; COT- carbono orgânico total.

Para Lopes et al. (2005), a maior parcela das impurezas encontradas no lodo de ETA é de natureza inorgânica (areia, siltes e argilas), e a parte orgânica é constituída de substâncias húmicas.

Hoppen *et al.* (2005) realizaram estudos com lodo de ETA analisando pH, condutividade, oxigênio dissolvido (OD), demanda química de oxigênio (DQO), dureza, turbidez, metais (Al, Cr, Fe, Ni, Pb, Cd, Zn, Mn, Cu), sólidos e nutrientes (N e P) nos períodos chuvosos e secos. As variáveis pH, turbidez, sólidos totais, sólidos suspensos, DQO, nitrogênio e fósforo expressaram a influência do período chuvoso. Os metais alumínio, ferro e manganês apresentaram concentrações elevadas nesse mesmo período, o que se justifica pelo aumento da dosagem de coagulantes utilizados em razão da presença, na água, desses contaminantes provenientes de lixiviação dos solos.

### **3.3.3 DISPOSIÇÃO DO LODO DE ETA E ALTERNATIVAS DE UTILIZAÇÃO**

Os lodos lançados nos corpos de água causam problemas ambientais, como aumento da quantidade de sólidos em suspensão, assoreamento, mudança de cor, aumento das concentrações de alumínio e, ainda que incipiente, um aumento demanda química de oxigênio. Souza (2006) afirma que há uma redução do oxigênio dissolvido no corpo receptor pela decomposição da matéria orgânica contida nesse resíduo.

Os órgãos ambientais têm buscado soluções técnicas e ambientalmente vantajosas para o destino dos resíduos das ETAs. Uma alternativa promissora é a reutilização, o que pode minimizar a disposição inadequada desses resíduos.

Ao sair da ETA, o lodo contém mais de 90% de água. Ele pode passar por um processo de desidratação, no qual a concentração de sólidos pode aumentar para, aproximadamente, 65%. O lodo desidratado pode ser destinado para adubação, incineração, aterro sanitários de lixos urbanos, compostagem com lixo urbano, etc. Entre as alternativas de descarte do lodo tem-se a utilização em massas para confecção de tijolos.

### **3.3.4 ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO PRÉVIO, DESIDRATAÇÃO E DISPOSIÇÃO DO LODO**

Existem diferentes alternativas de tratamento prévio para disposição final do lodo que merecem destaque, principalmente tratando-se do possível

aproveitamento em processos produtivos de materiais passíveis de serem utilizados, sendo os principais descritos a seguir:

O método de adensamento, segundo Richter (2001), deve ser realizado após remoção dos lodos dos decantadores, os quais possuem água distribuída livremente nas partículas e que necessitam serem retiradas para redução do volume da torta. A viabilidade do adensamento consiste na produção de uma torta concentrada de sólidos, mais adequada para prosseguir com seu tratamento. O adensamento dos lodos gerados nas ETA's pode ser feito por gravidade, flotação com ar dissolvido ou adensadores mecânicos por tela (AWWA/EPA/ASCE, 1996). Após o adensamento existem várias tecnologias aplicáveis a desidratação do lodo.

A desidratação de lodos dispostos em lagoas ocorre nas três seguintes fases: drenagem, evaporação e transpiração. Algumas experiências têm mostrado que a drenagem é independente da profundidade da lagoa, ressaltando que a evaporação é um dos principais fatores para a “desidratação” (AWWA, 1991). Vários são os fatores que devem ser avaliados como critérios de projeto, pois o tempo para desidratação pode variar principalmente em função do clima, da permeabilidade do solo, das características do lodo, da profundidade da lagoa, da área superficial, entre outros. Ressalta que as lagoas podem ser naturais ou construídas através de diques ou escavações que possuam sua localização próxima às ETA's, com condições geofísicas e topográficas adequadas.

Os leitos de secagem, conforme mostra a Figura 5, são utilizados na remoção de águas e obedecem, basicamente, os mesmo critérios de projetos destinados à secagem de lodos de estações de tratamento de águas residuárias industriais e sanitárias. Pesquisas para remoção de água dos lodos em leitos de secagem têm sido efetuadas desde 1900, quando se verificou que lodos digeridos desidratavam-se mais rapidamente do que os lodos brutos (Ferranti e Gehling, 2005).



Figura 5. Leito de secagem piloto da Unicamp. Fonte: Porras et al. (2005).

Cordeiro (2001) estudou o leito de secagem tradicional em escala-piloto com diversos arranjos buscando uma melhor condição de desaguamento e de operação. Em seus estudos apresentou um leito drenante constituído de apenas uma camada de 15 a 30 cm de brita, recoberta com manta geotêxtil, Figura 6. Desse modo, passou a ser denominado de leito de drenagem devido aos resultados de tempo de drenagem bastante reduzido.

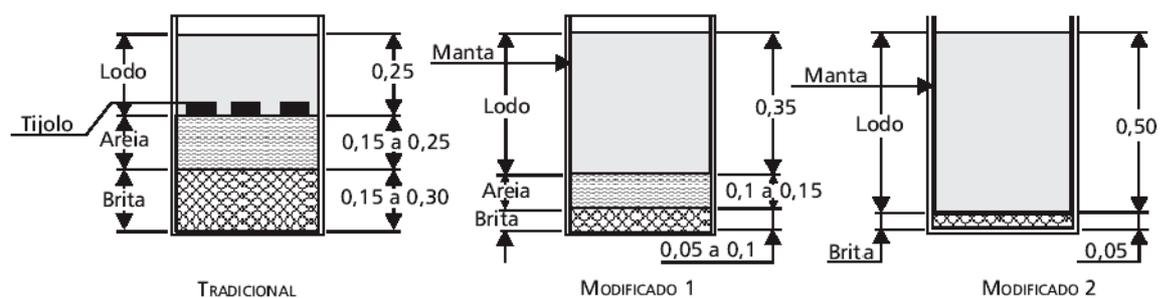


Figura 6. Esquemas ilustrativos dos sistemas de leitos de secagem tradicionais modificados por Cordeiro (2001).

A desidratação do lodo também pode ser feita através de processos mecânicos. Atualmente, existem diversos equipamentos disponíveis no mercado brasileiro que atendem às exigências de uma torta com 15 a 35% de sólidos e que estão citados, a seguir, em ordem crescente de custo:

- Prensa desaguadora;
- Centrífuga;
- Filtro prensa;
- Filtro rotativo a vácuo;

As tecnologias atualmente disponíveis para secagem de lodos realizam uma ou mais combinações dos seguintes princípios:

- (1) Separação por sedimentação: em um campo de forças gravitacionais centrípetas;
- (2) Filtração: quando os sólidos são grandes o suficiente para serem retidos num meio ou superfície filtrante.

A aplicação do primeiro princípio inclui o adensamento por gravidade, a flotação e a centrifugação. O filtro a vácuo, o filtro prensa e a prensa desaguadora são aplicações do segundo princípio.

A aplicação em solos deverá ser determinada em função das características físicas e químicas específicas para cada lodo, principalmente pela existência de nutrientes benéficos às culturas e por ausência de contaminantes (Dayton e Basta, 2001).

O lodo é gerado em processos de tratamento físico-químico, não envolvendo processos biológicos, portanto, deve ser demonstrada a sua eficiência por meio de experimentos específicos para aplicação diretamente no solo em benefício agrícola.

Apesar de conter certo teor de matéria orgânica, os lodos de ETAs normalmente não são atrativos para disposição direta no solo, segundo requisitos técnicos de concentração de metais pesados para plantas, a exemplo, a presença excessiva de alumínio proveniente principalmente do coagulante utilizado no processo de coagulação.

No Brasil, a NBR 10.004 tem sido utilizada para licenciar e operar aterros sanitários, estendendo-se seus conceitos para enquadramento dos lodos de ETAs e Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) e suas respectivas disposições. As caracterizações realizadas em alguns estudos enquadraram os lodos das ETAs como sendo de Classe II, não inerte Hoppen et al., 2006. A disposição do lodo em aterros é uma alternativa conhecida e segura para a saúde pública e ambiental, quando corretamente projetado e operado, podendo essa prática ser viabilizada a partir de aterros existentes ou da implantação de aterros exclusivos. No caso de aterros particulares ou municipais, a disposição dos lodos desidratados implica custos de transporte e

disposição e, no caso de aterros exclusivos, em custos de implantação, operação e transporte até o local.

A disposição final do lodo de ETA, na rede coletora de esgoto, é um método consideravelmente adequado, porém, sua utilização depende de fatores econômicos e logísticos. Dentre esses fatores está a existência de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) nas proximidades da ETA com condições técnicas operacionais de receber os resíduos e ter disponibilidade adequada para seu transporte desde a ETA até a ETE (Brink, 2005).

A princípio, o envio de lodos de ETA para ETE é uma solução tecnicamente viável, uma vez que as operações de tratamento de ambas as fases sólidas serão concentradas em uma única unidade de tratamento, com significativa economia de escala nos custos operacionais. No entanto, considerando que as ETEs podem possuir diferentes concepções com respeito a seus processos unitários, cada um dos lodos deverá ser avaliado individualmente quanto aos seus prováveis impactos no tocante ao processamento dos sólidos suspensos totais (SST), bem como, na eventual interferência nos processos biológicos de tratamento aeróbio e anaeróbio (Brink, 2005).

Deve ser enfatizado que a disposição de lodo de ETA em ETE não representa uma solução a custo zero, uma vez que, mesmo sendo possível o processamento de uma maior quantidade mássica de lodo, a ETE terá que ser preparada para o aumento do volume de lodo a ser processado em seu sistema de desidratação, e prevendo custos de transporte e disposição final.

Esta alternativa é particularmente atraente quando não há áreas disponíveis na ETA para a implantação do sistema de tratamento de lodos (adensamento e desidratação) ou quando a ETA se encontra em área densamente urbanizada, na qual o transporte do lodo desidratado por caminhões poderia causar transtornos ao trânsito local.

Brink (2005) demonstrou através de ensaios de laboratório, a possibilidade de lançar o lodo da ETA Guaraú/SP diretamente na rede coletora de esgoto da ETE Barueri, ambas operadas pela Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (SABESP). Decorrente da inviabilidade de construção de um sistema de tratamento de lodo na própria ETA, por falta de espaço físico, a

solução encontrada e analisada foi a de lançar na rede coletora de esgoto. Neste trabalho, pode-se concluir que houve um acréscimo de 20 a 30% de massa de sólidos na torta de lodo gerada na ETE, além do tempo de filtração ter aumentado próximo de 100%. Entretanto, os autores citam que existem ajustes a serem feitos em escala real para que essa prática seja realizada com sucesso.

A incineração é um método dispendioso, sendo que os custos podem chegar a R\$ 2.000,00 por tonelada de lodo desidratado (SABESP, 2002). Algumas análises efetuadas demonstraram que o lodo de ETA tem baixo poder calorífico, gerando, aproximadamente, 10 a 15% de cinzas a 600 °C (SABESP, 2002). O método é uma alternativa muito dispendiosa, por não eliminar a fase de desidratação dos lodos e, por não resolver integralmente o problema, já que restam cinzas a serem dispostas sem aterros, apesar de diminuir, significativamente, seus volumes finais.

Várias pesquisas apontaram os efeitos negativos dos lodos de ETA quando lançados, sem controle, no meio ambiente. Segundo Cornwell *et al.* (1987), citado por Cordeiro (1993), pesquisas utilizando peixes da espécie *S. Trutta* 1 mostraram que dosagens entre 0,2 e 0,5 mg/L de alumínio causaram sintomas de apatia e inabilidade para se manterem em equilíbrio, coloração escurecida tendendo à morte.

Segundo Cordeiro (2001), a AWWA identificou no monitoramento biológico das águas que o alumínio provoca alterações na estrutura macrobentônica.

Mendes de Meneses *et al.* (2005), evidenciaram a alteração das características físico-químicas do rio Avenca/PB, ao receber continuamente o lodo gerado no decantador da ETA Pedra do Fogo. A investigação procedeu-se no sentido longitudinal do rio, partindo do ponto de lançamento até 200 metros a sua jusante. Detectaram-se, em sete meses de monitoramento, alterações significativas das concentrações de alumínio para rio de Classe II e valores superiores aos limites de cor, segundo resolução CONAMA 357/05. A partir dessas informações pôde-se evidenciar que a poluição dos recursos hídricos, mediante o lançamento de lodo, gera riscos à população que utiliza o rio como bem público.

Os lodos provenientes de ETA contêm concentrações elevadas de metais pesados, sobretudo de alumínio e ferro (Hall e Hall, 1989; Barbosa, 2000), que ao serem lançados "in natura" em cursos d'água podem induzir toxicidade aos organismos aquáticos e aumentar a degradação desses ambientes, considerando que esses efluentes, além de conterem metais pesados, possuem elevadas concentrações de sólidos, alta turbidez e potencial de demanda química de oxigênio (DQO). Esses indícios críticos podem causar o assoreamento do curso d'água além de alterações biológicas na cor e na composição química da água vazante. Tem sido argumentado que os lodos gerados nos decantadores e nos filtros originam-se da água bruta e, por isso, devem retornar a sua fonte.

Segundo Cordeiro (1993), os lodos de ETA possuem grandes concentrações de alumínio. Esse material quando disposto com baixa velocidade nos rios ou lagos, poderá causar alterações, principalmente nas camadas bentônicas, podendo inviabilizar o lançamento de lodos de ETA em cursos d'água. No entanto, essa atividade em muitos países gera enormes quantidades de resíduos que são descartados, diariamente, nos corpos hídricos (Wang et al, 2005).

Alternativas para reutilizar o lodo contendo sulfato de alumínio como agente auxiliar no processo de floculação foram pesquisadas e resultaram eficientes como apresenta Cordeiro (1981)

Chao (2006) desenvolveu um trabalho com o objetivo de avaliar a eficiência de remoção de fósforo do efluente de um sistema convencional de lodos ativados usando lodo de ETA, que utiliza sulfato de alumínio como coagulante. Outro objetivo do estudo foi verificar a influência das seguintes variáveis nesta remoção: tempo de permanência do lodo no decantador, dosagem de lodo, potencial zeta, teor de matéria orgânica no lodo, pH da mistura lodo/efluente e uso de polímero na coagulação/floculação da água bruta. Concluiu-se que os lodos de ETAs que utilizam o sulfato de alumínio podem ser reciclados e utilizados como insumo para remoção de fósforo de ETEs. Na presente pesquisa foi recomendado um melhor conhecimento sobre o potencial do lodo de diferentes ETAs que utilizam outros coagulantes e possíveis interferências na sua utilização para a remoção de fósforo em efluentes finais.

Outra recomendação foi verificar a necessidade de revisão da legislação e uma maior integração entre as agências ambientais e companhias de saneamento básico no enfrentamento das questões relacionadas a controle e preservação da qualidade dos mananciais.

### **3.2.5 ESTUDOS DE REAPROVEITAMENTO DE LODO DE ETA**

O setor de saneamento vem buscando soluções práticas de reciclagem e reutilização dos resíduos gerados no processo de tratamento de água. Sabe-se que, quando dispostos de forma inadequada, esses resíduos podem ocasionar severos impactos de ordem ambiental e social. Por outro lado, em função das propriedades físicas e químicas dos lodos serem por natureza heterogênea, há possibilidade de serem reaproveitados de forma a agregar valor ao resíduo e dispor de forma ambientalmente correta.

O trabalho de Andreoli *et al* (2003) teve por objetivo principal a caracterização do lodo gerado na ETA Passaúna/PR Durante um período de dois meses consecutivos, foram retiradas amostras do lodo, e a finalidade era detectar a possível variação nas suas características. Na incorporação de lodo em matriz de concreto, verificou-se que é possível incorporar no máximo 7% para produção de artefatos e estruturas pré-moldadas até pavimentos em concreto. Concluiu-se que a utilização do lodo reduziu o consumo de matérias-primas naturais, tais como: areia, brita e cimento, diminuindo, paralelamente, a extração de recursos naturais, como também, a disposição final que, na maioria dos casos, faz-se a jusante do próprio manancial de captação.

Sabbag (2003) realizou o estudo de reutilização de lodo da ETA de Cubatão em misturas de argilas para produção de blocos cerâmicos. O lodo pode ser incorporado em até 12,5% à massa de argila, em função dos valores obtidos de resistência à compressão dos blocos idênticos aos produzidos somente com argila, com baixa retração e resistência à compressão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7171/95.

Dias et al. (2002) apresentaram os resultados de duas experiências de utilização de lodo de ETA. Na primeira, foi feita a caracterização detalhada do lodo da ETA e avaliou-se o percentual de lodo que adicionado à argila da cerâmica apresentasse o melhor resultado. Decidiu-se por uma segunda

experiência em outra cerâmica, na qual o produto original fabricado fosse, previamente, avaliado e atendesse às exigências da legislação, com qualidade e classificação definidas. Os resultados indicaram que o aumento do percentual de lodo na argila reduz a resistência dos blocos cerâmicos à compressão. Os blocos fabricados com 10 % de lodo atenderam as exigências da ABNT e se enquadraram na Classe 15 de resistência à compressão. Essa é a mesma classe em que se enquadravam 100% dos blocos originalmente fabricados em cerâmica. A adição de 20% de lodo à argila atendeu a legislação, mas os blocos foram enquadrados na Classe 10 de resistência à compressão, inferior ao padrão de produção da Cerâmica. Os blocos com adição de lodo variando entre 30 e 50% não atenderam à legislação. Os resultados econômicos, nas experiências, indicaram que se o transporte do lodo for retirado dos custos, estes podem se manter inalterados ou até mesmo sofrerem redução, conforme constatado na Cerâmica Maná na qual o bloco fabricado com 10% de lodo teve redução de 1,54% nos custos do seu milheiro.

Oliveira et al (2004) detectaram em seu estudo de caracterização do lodo gerado na ETA de Campos de Goytacazes/RJ, fases cristalinas referentes a caulinita, quartzo e gibsita, com indícios de mica e muscovita. Do ponto de vista químico, verificou-se que o lodo é constituído, basicamente, por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que corresponde a cerca de 80,4% de todos os elementos químicos detectados. As outras características foram: perda ao fogo de 16,9%, pH de 6,5, os índices de Atterberg foram limite de plasticidade (LP) % (55), limite de liquidez (LL) % (73), e índice de plasticidade (IP) % (20). O lodo apresentou morfologia irregular das partículas e larga distribuição de tamanho entre 1 a 425  $\mu\text{m}$ . As características do lodo apresentaram-se próximas as das argilas encontradas na região de Campos de Goytacazes, e os autores concluíram que o lodo é adequado para utilização em argilas de cerâmica vermelha, porém, em concentrações específicas.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da caracterização química de lodos de ETA apresentados em diversos artigos na literatura. Observou-se que quando o lodo é submetido à sinterização em elevadas temperaturas ( $\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) ocorre uma perda de massa caracterizando material com indicativo

de deformação e retração devido à presença de matéria orgânica e elementos fundentes a baixa temperatura.

TABELA 9. Composição química dos lodos de ETA já caracterizados

Óxidos	% em Massa						
	Oliveira et al (2004)	Ferranti e Gehling (2005)	Andreoli et al (2003)	Wolff et al (2005)	Hoppen et al (2005)	Monteiro et al (2007)	Paixão (2005)
SiO <sub>2</sub>	35,92	37,28	14,1	37,7	16,55	24,68	12,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,71	25,63	23,62	30,5	13,07	30,39	8,57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,79	9,97	8,39	12,4	4,15	11,59	72,9
TiO <sub>2</sub>	1,1	0,84	0,35	1,00	0,19	0,90	-
MnO	0,09	0,05	-	0,30	0,22	-	0,54
MgO	0,37	0,74	0,15	0,4	0,15	0,17	-
CaO	0,10	0,29	0,33	0,20	0,43	0,16	5,23
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,09	0,02	0,20	0,04	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,35	0,75	0,34	0,30	0,26	-	-
Perda ao Fogo	16,93	25,15	49,01	17,10	49,79	30,67	15,00

No trabalho de aproveitamento de lodo em cerâmica vermelha desenvolvido por Paixão (2005), cujo objetivo foi testar a incorporação de lodo em massa cerâmica para verificar a interação e possibilidade de utilização do resíduo como forma de destinação final, observou-se que, com a adição do lodo na mistura de argila, produziram-se alterações das propriedades mecânicas em comparação aos corpos cerâmicos produzidos somente com argilas puras. Identificou-se que as partículas de lodo atuaram como inclusões amorfas na massa argilosa até 1000 °C, o que favoreceu a fratura do corpo cerâmico, diminuindo assim a resistência. Entretanto, foi possível adicionar até

10% de lodo à matriz cerâmica, na qual as propriedades apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos para cerâmica vermelha para construção civil.

De acordo com Megda et al. (2005), as características físicas e químicas de lodos de ETAs são, muitas vezes, similares às características dos materiais utilizados na fabricação de tijolos, pois apresentam propriedades físicas e químicas similares à argila natural e xistos utilizados na produção desses materiais (Figura 7). As grandes quantidades de lodos, gerados em ETAs, podem diminuir, significativamente, a quantidade de argila e xisto utilizados na fabricação de tijolos, aumentando a vida útil das jazidas naturais. A presença de cal no lodo, por outro lado, compromete a qualidade do tijolo produzido, inviabilizando a sua aplicação, segundo os autores.



Figura 7. Tijolos fabricados com lodo e argila ([www.finep.gov.br/prosab/4\\_lodo\\_ufrn.htm](http://www.finep.gov.br/prosab/4_lodo_ufrn.htm))

A escola SENAI Mario Amato (2006) avaliou a viabilidade técnico-econômica para confeccionar produtos cerâmicos utilizados em construção civil, incorporando o resíduo (lodo) proveniente de tratamento de água para abastecimento. Os lodos considerados nesse trabalho são provenientes de ETAs da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), operadas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP, a saber: Guaraú, Alto da Boa Vista e Taiapuêba (Alto do Tietê). Diante dos custos apresentados conclui-se que o uso benéfico do lodo, utilização em cerâmicas, pode trazer vantagens econômicas, porém, a sua implantação dependerá do interesse das indústrias cerâmicas.

Teixeira et al. (2006) detectaram, em seu trabalho, os seguintes principais argilominerais presentes nos lodos de ETA: montmorilonita, quartzo,

óxido de titânio, gibsitita e caulinita. Em geral, a adição dos lodos à massa cerâmica piorou suas propriedades, entretanto, os valores obtidos para as propriedades tecnológicas ainda permaneceram dentro dos valores dos limites aceitáveis para a produção de tijolos, dependendo da temperatura de queima e da concentração na mistura. O lodo obtido com floculante à base de alumínio, em geral, prejudicou mais as propriedades cerâmicas do que aqueles à base de ferro. Os resultados indicaram que o lodo de ETA pode ser incorporado à massa cerâmica para produzir material cerâmico.

Monteiro et al (2007) estudaram as características do lodo gerado na ETA de Campos dos Goytacazes e detectou-se, na análise química dos elementos, que  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  eram majoritários. Verificou-se que, o lodo possui 86,5% dos grãos com diâmetro menor que 2  $\mu\text{m}$ , 5,5% na faixa de 2-20  $\mu\text{m}$ , 7,6% para 20-200  $\mu\text{m}$  e 0,4% >200  $\mu\text{m}$ .

Wolf et al (2005) caracterizaram o lodo da ETA da empresa de celulose CENIBRA - Celulose Nipo-Brasileira S/A, para que, em trabalho futuro, seja pesquisada a viabilidade de substituição total da argila por ele nos processos de fabricação de alguns artefatos cerâmicos. Pela análise conjunta dos dados e resultados concluíram que o lodo tem sua composição química semelhante à das argilas podendo vir a substituí-las nos processos de fabricação de artefatos cerâmicos.

Moruzzi (2008) avaliou a viabilidade de incorporação do lodo de ETA na argila utilizada como matéria-prima na produção de cerâmica vermelha. Para tal, foi necessária a caracterização física do lodo gerado no município de Rio Claro - SP e a confecção de corpos de prova da mistura lodo-argila (com umidade de 8% e concentrações de lodo de 5, 15 e 30% em massa) além da realização de ensaios tecnológicos na mistura após queima à temperatura de 950°C. Em geral, a adição do lodo de ETA piorou as propriedades da massa cerâmica, entretanto, os valores obtidos com os ensaios na concentração de 5% de lodo, ainda permaneceram dentro de limites estabelecidos pela NBR13818/97 para a produção de peças cerâmica vermelha.

O objetivo do trabalho de Ferreira et al. (2009) foi determinar as características do lodo da ETA de Duas Bocas administrada pela Companhia

Espírito Santense de Saneamento (CESAN), para posterior incorporação em concreto e fabricação de tijolos. A caracterização do lodo mostrou um alto percentual de umidade, densidade próxima da água e pH levemente ácido. Já os testes de resistência do concreto, após a incorporação do lodo, mostraram resultados satisfatórios quanto ao teor de lodo incorporado, além de indicarem a influência do tempo de cura nas características finais.

O trabalho de Botero (2008) envolveu a caracterização do lodo produzidos nas estações de tratamento de água em Jaboticabal-SP usando  $\text{FeCl}_3$  como floculante e do lodo produzido em Taquaritinga-SP e Manaus-AM utilizando  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  como floculante. Uma avaliação também foi feita da interação da matéria orgânica extraída do lodo com espécies metálicas diferentes. Os resultados indicaram que todos os lodos de ETA têm um importante potencial agrícola e que seu uso depende das características da água bruta e do tipo de floculante utilizado no tratamento convencional. As substâncias húmicas extraídas dos lodos mostraram afinidades diferentes para as espécies de metal, favorecendo o intercâmbio eventual entre metais potencialmente tóxicos e macro e micronutrientes. Uma alternativa para a utilização dos lodos na agricultura seria para pré-tratamento na remoção de metais potencialmente tóxicos e enriquecê-la com macro e micronutrientes que podem ser liberados para a planta.

### **3.4 TIJOLOS ECOLÓGICOS**

#### **3.4.1 TIJOLO SOLO-CIMENTO**

Segundo Sjöstrom (1996), o tijolo ecológico surgiu no mercado pela evolução de políticas ambientalistas e pela mobilização da sociedade civil para o desenvolvimento sustentável da Nação. O tijolo é denominado ecológico por atenuar a agressão ambiental em razão da diminuição da extração de argila, da baixa emissão de  $\text{CO}_2$  na atmosfera e da redução na derrubada de árvores para queima.

O material utilizado para a fabricação dos tijolos ecológicos é diferente dos tijolos tradicionais que, geralmente, utilizam a argila pura, retirada do fundo de vales e encostas de rios, o que prejudica a vegetação do entorno. Além disso, os tijolos ecológicos não exigem cozimento, o que evita a queima de

madeira ou carvão. A queima de matéria orgânica como carvão e madeira resulta na emissão de gás carbônico para a atmosfera, uma das principais causas do aquecimento global (Sjöstrom, 1996).

O primeiro tijolo ecológico desenvolvido foi denominado solo-cimento por ser produzido pela mistura dos dois materiais.

Segundo Ferraz e Segatini (2004) o solo-cimento é o produto resultante da mistura íntima de solo, cimento portland e água que, compactados na umidade ótima e sob a máxima densidade, em proporções previamente estabelecidas, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento (ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, 1986). O interesse pelo assunto, no Brasil, deu-se a partir de 1936, pela ABCP, que pesquisou e regulamentou a sua aplicação.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986), o solo-cimento “é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas”. O produto resultante “é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade”. Dos materiais, o solo é o elemento mais utilizado para sua obtenção e o cimento colocado para estabilizá-lo varia de 5% a 10% do total, o qual confere as propriedades de resistência no composto. Os solos mais apropriados são os que possuem teor de areia entre 45% e 50%, limitando-se o uso para os que contêm matéria orgânica ao composto.

A fabricação de componentes de alvenaria de solo estabilizado teve sua evolução com a criação da “Prensa Cinva-Ram”, pelo Centro Interamericano de Vivienda y Planejamento – Cinvia (1961). Trata-se de uma prensa manual para a produção de tijolos de solo-cimento compactados.

No Brasil, os tijolos de solo-cimento compactados foram pesquisados, principalmente, pelo IPT (1977a, 1977b, 1978).

Desde então, vários fabricantes desenvolveram prensas manuais e hidráulicas para a fabricação de diversos tipos de tijolos e blocos de solo-cimento compactado. Segundo Faria (1990) e Violani (1987), poucos daqueles fabricantes conseguiram permanecer no mercado, pois se constatou um

abandono dessa tecnologia em razão de um preconceito em relação ao material.

De fato, o processo de estabilização compreende uma gama de variáveis bastante complexas e requer conhecimento e controle tecnológico eficiente para a geração de um produto de qualidade.

É consenso que as qualidades do produto do solo estabilizado dependem, primordialmente, da matéria-prima, ou seja, do solo. Faria (1990) expõe que, mesmo após a estabilização, é comum a ocorrência de uma série de patologias, como por exemplo:

- variações volumétricas por reações da água com aditivos, retrações e aparecimento de fissuras;
- degradação do material devido à presença de sais solúveis em água, de matéria orgânica, de materiais expansivos ou partículas friáveis (feldspatos e micas);
- propriedades heterogêneas na série produzida em função da descontinuidade nas características da matéria-prima.

Convém destacar, com relação ao componente tijolo, as diferenças entre o tijolo de barro cozido (ou cerâmico) e o tijolo de solo estabilizado.

Segundo Van Vlack (1973), nos produtos cerâmicos, o esqueleto dos grãos minerais formados durante a queima é o responsável pelas propriedades mecânicas. Dessa forma, o material resultante é leve, resistente e poroso. O tijolo de barro cozido, no processo de queima (ou sinterização) tem a área específica das partículas reduzida, causando redução do volume aparente e aumento da resistência mecânica. O resultado de diversos fenômenos físicos que ocorrem durante a queima, consequência da aproximação e contato das partículas, reduz a porosidade.

A qualidade do tijolo de solo-cimento prensado é função do empacotamento dos grãos do solo depois de compactado. O material resultante tem baixa porosidade e alta densidade. O equipamento utilizado para a moldagem do tijolo desempenha papel fundamental, pois ele condiciona a taxa de compactação do material e as características produtivas em si, conforme avaliações de Faria (1990).

Ferraz Junior (1995) comparou as características de diversas prensas existentes no mercado, a Tabela 10 apresenta um resumo desse estudo.

TABELA 10. Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado

Tipo de Prensa	Energia de Compactação (Mpa)	Taxa de Compactação do Solo	Produção (tijolos/dia)
Manual	Mecânica 1,5 a 2,0	1,38	300 a 1200
	Hidráulica 2,0 a 10,0	1,65	2000 a 2800
Motorizada	Mecânica 4,0 a 24,0	>1,65	1600 a 1200
	Hidráulica > 20,0	>2,0	-

Os critérios para a dosagem do solo-cimento, em sua maioria, foram elaborados visando a sua aplicação em bases de pavimentos rodoviários e aeroportuários.

De acordo com o CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (1989), a quantidade de cimento a ser utilizada na dosagem deve ser determinada em função das características do solo, do teor de umidade e da densidade a ser obtida na compactação.

O processo de fabricação dos tijolos solo-cimento abrange as seguintes etapas:

- Preparação do solo: que consiste em destorroar e peneirar o solo seco;
- Preparo da mistura: adiciona-se o cimento ao solo preparado e realiza-se uma homogeneização dos materiais secos; depois, adiciona-se água e mistura-se o material até uniformizar-se a umidade do solo;
- Moldagem dos tijolos: pode ser efetuada em prensas manuais ou hidráulicas;
- Cura e armazenamento: durante os sete primeiros dias os tijolos devem ser mantidos úmidos por meio de sucessivas molhagens.

As quantidades de material (solo, cimento e água) a serem misturadas podem ser medidas em massa. A relação entre as quantidades deve propiciar tijolos com qualidade satisfatória após os primeiros sete dias de cura.

O aprimoramento de equipamentos para a fabricação dos tijolos tem contribuído para a racionalização das técnicas de construção, possibilitando a elaboração de projetos com maior qualidade, permitindo o uso do material em

obras de padrão médio. Tem-se, na Figura 8, uma ilustração da amarração em encontro de paredes e do tijolo furado, cujo assentamento é feito por encaixe, proporcionando maior rapidez na execução da alvenaria. Os furos coincidentes possibilitam a passagem de tubulações, permitindo também a execução de colunas grauteadas.



Figura 8. Amarração em encontro de paredes e detalhe do tijolo furado

Fonte: <http://www.bsi.com.br/unilivre/centro/experiencias/experiencias/395.html>

As vantagens dos tijolos solo-cimento vão desde sua fabricação até sua utilização no canteiro de obras. Os equipamentos utilizados em sua fabricação são simples e apresentam baixo custo. A mão-de-obra para operar os equipamentos não precisa ser especializada, e a fabricação pode ser feita no próprio canteiro de obras.

A resistência à compressão, em geral, é superior à do tijolo convencional. A qualidade e o aspecto final das peças são visivelmente superiores, com maior regularidade dimensional e planicidade de suas faces. Isto propicia menor consumo de argamassa de assentamento e de revestimentos. Existe ainda a possibilidade de o tijolo de solo-cimento ser empregado em alvenaria aparente, necessitando apenas uma pintura impermeável para o seu acabamento.

Os tijolos ecológicos, como aquele mostrado na Figura 9, deixam poucos resíduos por causa de sua estrutura modular em que há um orifício interno por onde podem passar as instalações elétrica e hidráulica evitando a quebra da

alvenaria, como acontece no sistema de construção convencional (Sjöstrom, 1996).



Figura 9. Tijolo com estrutura modular

Ao contrário dos tijolos de argila queimada, que quando quebram não podem ser reaproveitados, os de solo - cimento podem ser moídos e prensados novamente.

Grande (2003) efetuou a análise de aspectos de tijolos modulares compostos por misturas binárias e ternárias de solo-cimento e solo-cimento-sílica produzidos em prensa manual modelo SAHARA, com a finalidade de se obter parâmetros e diretrizes que visavam um melhor desempenho do material. Vários ensaios em corpos-de-prova cilíndricos foram realizados resultando no suporte para a fundamentação de diversas avaliações sobre as composições de traços utilizados na fabricação dos tijolos. Executou painéis de parede com o objetivo de verificar o comportamento da alvenaria em relação à resistência, à compressão e à de formabilidade, possibilitando correlações com os resultados dos ensaios de prismas, tijolos e argamassa de assentamento. As contribuições da pesquisa permitiram relacionar a tecnologia da fabricação de tijolos de solo-cimento com o contexto de construção sustentável e o aproveitamento de resíduos industriais, além de sistematizar informações para a elaboração de um projeto tecnológico com os tijolos modulares.

### 3.4.2 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA MANUFATURA DE TIJOLOS ECOLÓGICOS

Atualmente, existem alternativas para confeccionar tijolos ecológicos utilizando resíduos industriais. Entre as matérias primas existentes, destacam-se: cinzas de carvão (Chies et al, 2003); lodo de ETA (Teixeira et al, 2006); resíduos siderúrgicos - como a ferrugem formada nos processos de laminação e lingotamento do aço e a poeira filtrada nas chaminés das indústrias (Fay, 2006); resíduos petroquímicos, como a zeólita, substância que sobra do craqueamento do petróleo quando são extraídos os seus derivados; rejeitos do desmonte de operações de mineração e resíduos ricos em óxidos de ferro.

Porras et al. (2008) desenvolveram estudos com o objetivo de avaliar a viabilidade da utilização dos lodos dos decantadores das estações de tratamento de água da Cidade de Campinas, SP, Brasil, juntamente com o agregado reciclado miúdo de resíduo da construção civil deste município, na fabricação de tijolos estabilizados com cimento. Procurou-se incorporar a máxima quantidade de lodo e minimizar a de cimento. Desta forma, foram investigadas as proporções mássicas cimento: agregado reciclado miúdo:lodo de 5:85:10, 5:80:15, 5:75:20, 5:50:25, 10:80:10, 10:75:15, 10:70:20 e 10:65:25. Para cada uma destas proporções, variou-se, como componente principal de avaliação, o teor de umidade do lodo: 0, 50, 70 a 74% e 75 a 80%. Os tijolos foram confeccionados com prensa manual, tipo solo-cimento, e na umidade ótima pré-determinada através de ensaio de PROCTOR. Os resultados mostraram que a umidade do lodo influenciou significativamente na qualidade dos tijolos, sendo possível sua confecção somente com teor de umidade abaixo de 50%. Nenhum tijolo produzido nas condições estudadas no presente trabalho atendeu simultaneamente aos requisitos das normas brasileiras de qualidade - dimensões, absorção de água e resistência à compressão.

Souza (2006) pesquisou o aproveitamento de resíduos de construção e demolição na fabricação de tijolos de solo-cimento. A influência da adição de agregados reciclados de concreto nas características físicas e mecânicas do solo-cimento foi avaliada visando sua aplicação na fabricação de tijolos prensados. Os tijolos foram moldados por meio de uma prensa manual, usando-se dosagens a partir do solo natural; solo mais 20% de agregados

reciclados de concreto; solo mais 40% de agregado reciclado de concreto e solo mais 60% de agregado reciclado de concreto, com o emprego de três teores de cimento, 6%, 8% e 10%, todos em relação à massa resultante da mistura solo-resíduo. A adição do resíduo de concreto ao solo melhorou as propriedades mecânicas do tijolo solo-cimento, possibilitando redução de custos e produção de tijolos prensados de melhor qualidade, constituindo-se, portanto, numa excelente alternativa para o aproveitamento desse material.

Silva (2009) realizou ensaios objetivando avaliar a viabilidade de incorporação de lodo de Estações de Tratamento de Água em tijolos de solo-cimento como forma de minimizar os impactos causados por esses resíduos ao meio ambiente. Para esse propósito, foi feita a caracterização física do solo e do lodo empregados a fim de determinar a umidade, a granulometria, os limites de Atterberg e a compactação. Na análise de difração de raios-X foi identificada a presença dos argilominerais montmorilonita no lodo e da caulinita no solo, revelando a predominância de granulometria média à fina dessas amostras, indicando que, para trabalhar com a fabricação de tijolos de solo-cimento-lodo, é necessário modificar a porosidade desse material. Os tijolos foram confeccionados a partir dos percentuais de 3%, 5%, 8% e 10% de lodo incorporado na massa de solo-cimento-cal em prensa manual modelo Sahara, com umidade próxima da ótima, a qual foi determinada através do teste do "bolo".

Inicialmente, foram construídos quatro lotes de tijolos (A3, A5, A8 e A10), contendo 24 tijolos por lote, com a incorporação do percentual de lodo pré-determinado para cada lote, totalizando 96 tijolos neste primeiro ensaio, denominado de principal. A produção dos tijolos foi feita em triplicata (A, B e C) repetindo a mesma formulação percentual de lodo usada no lote principal (A), para fazer a avaliação estatística dos dados obtidos nos ensaios, perfazendo um total de 288 tijolos em toda a pesquisa. Quatro tijolos de cada lote foram utilizados para o teste de absorção de água e quatro para a resistência à compressão, aos 7 dias, 14 dias e 28 dias de cura. Dos quatro tijolos analisados de cada grupo (A3-10, B3-10 e C3-10) aqueles com a incorporação de 3% e 5% de lodo de ETA apresentaram características construtivas dentro da NBR 10.836/1994. A classificação ambiental do material constituinte dos

tijolos das três repetições com 10% de lodo, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) foi caracterizada como material Classe II-B inerte.

Ferraz (2004) realizou pesquisas nas quais se utilizavam materiais e técnicas alternativas de construção, onde houve a adição de material granular, oriundo de resíduos da construção civil, em misturas de solo-cimento. Ensaios para a caracterização de amostras de solo, com características geotécnicas representativas dos solos comumente encontrados na Região Oeste do Estado de São Paulo, foram realizados. Também foram determinadas as composições deste solo com resíduos de argamassa de cimento, tendo em vista a fabricação de tijolos prensados de solo-cimento. Objetivou-se reduzir o custo de produção do solo-cimento, melhorar a qualidade do produto resultante e propiciar condições para o aproveitamento desses resíduos. Corpos-de-prova cilíndricos e corpos-de-prova confeccionados a partir de tijolos prensados foram moldados, os quais foram ensaiados seguindo-se as recomendações das normas técnicas brasileiras pertinentes. Os resultados obtidos mostraram que a adição do resíduo de argamassa de cimento ao solo melhorou as propriedades mecânicas do solo-cimento, possibilitando redução de custos e produção de tijolos prensados de melhor qualidade, constituindo-se, portanto, numa excelente alternativa para o aproveitamento desse material.

Segundo Teixeira et al. (2006), o resíduo (lodo) gerado nos decantadores das Estações de Tratamento de Água (ETA) possui composição variada, de acordo com a região onde ela está localizada, com o mês de coleta e com o coagulante usado. Os pesquisadores realizaram caracterizações física, química e mineralógica desse lodo e ensaios tecnológicos em corpos de prova, com a finalidade de avaliar a possibilidade de incorporação desse resíduo em massa cerâmica para produção de tijolos. A retração linear, a absorção de água, a porosidade, a massa específica aparente e ensaios de resistência à flexão em corpos-de-prova, com diferentes concentrações de lodo, foram avaliadas. Também, foi avaliado o efeito do tipo de floculante usado na ETA, sobre as propriedades dos corpos-de-prova. Em geral, a adição dos lodos de ETA à massa cerâmica piorou suas propriedades. Entretanto, os valores obtidos para as propriedades tecnológicas ainda permaneceram dentro dos valores limites aceitáveis para a produção de tijolos, dependendo da

temperatura de queima e da concentração na mistura. O lodo obtido com floculante à base de alumínio prejudicou mais as propriedades cerâmicas do que aqueles à base de ferro.

Reis (2007) pesquisou sobre a viabilidade de incorporação de quatro resíduos industriais em uma massa cerâmica que é freqüentemente utilizada na fabricação de tijolos. Os resíduos adicionados foram: resíduo de escória de alto-forno, resíduo da indústria cerâmica de revestimento e da indústria de reciclagem de vidros. Para o desenvolvimento do trabalho foram coletadas as nove argilas de diferentes olarias da região de Joinville identificadas com as letras de A até I. Os resultados obtidos mostraram que a incorporação dessas matérias-primas alternativas foi satisfatória, pois a avaliação das propriedades tecnológicas apresentou melhores resultados quando foram incorporados os resíduos estudados na argila D. Dentre todos os resíduos utilizados para incorporação, o vidro foi aquele que apresentou melhores resultados.

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e os métodos utilizados no trabalho experimental desta pesquisa.

##### **4.1 MATERIAIS**

###### **4.1.1 CINZAS DE CARVÃO**

Uma amostra de cinzas leves de carvão (1,650 Kg), retidas no filtro ciclone, foi coletada na Usina Termelétrica de Figueira (UTF), situada no município de Figueira, no Paraná, a qual é administrada pela Companhia Carbonífera do Cambuí Ltda. O filtro ciclone retém as partículas com dimensão superior a 0,10 mm. As cinzas não necessitaram de tratamento prévio e foram utilizadas como recebidas da fonte produtora.

###### **4.1.2. LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)**

As amostras do lodo de ETA (~ 100 Kg) foram coletadas na Estação de Tratamento Terra Preta situada na Estrada Lara Mara, 77 município de Terra Preta no estado de São Paulo, administrada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). As amostras foram coletadas no

leito de secagem com vasilhas plásticas e colocadas em formas para secagem. A amostra foi coletada em outubro de 2008 sendo que no período de coleta, o coagulante utilizado no tratamento foi o sulfato de alumínio.

#### **4.2. PRODUÇÃO DOS TIJOLOS**

A produção dos tijolos de cinza-lodo foi realizada no Grupo Aguilar na fábrica de Máquinas SAHARA, localizada na Rua Miguel Rachid, 456/468 - Ermelino Matarazzo - São Paulo - SP – Brasil. Os parâmetros utilizados para a produção dos tijolos, a partir de cinzas de carvão e lodo, foram semelhantes aos utilizados na produção de tijolos de solo-cimento.

A água potável, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de São Paulo – SP fornecida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) foi utilizada no estudo.

A metodologia adotada consistiu em identificar a proporção mais adequada de cinzas, lodo, solo, cimento e cal para a fabricação dos tijolos. O procedimento para a preparação das amostras seguiu a NBR10832/92 e NBR 10834/94. Sete lotes de tijolos, contendo três tijolos cada, foram confeccionados com diferentes composições mássicas indicadas na Tabela 11.

TABELA 11. Composição mássica dos tijolos

Tijolos (Lotes)	Cinzas	Lodo de ETA	Solo	Cimento	Cal
1	10%	90%	-	-	-
2	5%	45%	45%	5%	-
3	10%	20%	60%	10%	-
4	13%	20%	60%	-	7%
5	-	-	85%	15%	-
6	8%	20%	60%	12%	-
7	7%	20%	65%	-	13%

A confecção dos tijolos dos lotes de 1 a 3 foi realizada pela mistura dos materiais manualmente. Já a confecção dos tijolos dos lotes 4 a 7 teve uma primeira etapa realizada pela mistura dos materiais manualmente e uma segunda etapa onde foi utilizado um homogeneizador.

### 4.3 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

#### 4.3.1. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

O método utilizado para determinação quantitativa química foi a fluorescência de raios-X usando de parâmetros fundamentais. A composição química foi determinada em espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo RIX 3000, da marca Rigaku Company com sistema de dispersão de comprimento de onda (WDXRF). O procedimento de preparação de amostra foi

o de pastilha prensada de dupla camada utilizando-se, como aglutinante, 8 gotas de uma solução de álcool polivinílico (PVA) 5 % m/v.

#### **4.3.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X**

A amostra compactada de cinza, colocada em um porta amostra de aço inoxidável, foi analisada em difratômetro de raios X Rigaku, modelo Multiflex, com monocromador e com radiação Cu K- $\alpha$ , gerada a 40 kV e 20mA. A velocidade de varredura era de 0,5°/min e variou de 5 a 80° 2 $\theta$ . A identificação das fases cristalinas (composição mineralógica) se fez com auxílio do programa de computador Crystallographica, 0 Search-Match e do banco de dados de padrões de difração JCPDS, ano de 2003. Essa análise foi realizada no Centro de Ciência e Tecnologia dos Materiais (CCTM) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

#### **4.3.3. DETERMINAÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA**

A área superficial específica Brunauer–Emmet–Teller (BET) foi determinada pelo equipamento BET Surface Area Analyser – Versão 3.11 – Quanta-Chrome Corporation – Nova 1200. Primeiramente, a amostra foi calcinada por 4 horas na Mufla a 800°C para retirada de voláteis e gases interferentes, em seguida, houve adsorção de nitrogênio para garantir a atmosfera inerte. Finalmente, a determinação foi feita por meio da adsorção e dessorção de nitrogênio nas amostras em condições de vácuo de 0,1 mm Hg. Essa análise foi realizada no Centro de Ciência e Tecnologia dos Materiais (CCTM) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

#### **4.3.4. DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA**

A massa específica ou densidade real foi determinada em picnômetro de hélio de pós sinterizados de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> e de Al. O equipamento utilizado foi da marca Micromeritics Instrument Corporation, modelo Accupyc 1330, com cilindro de gás hélio 4.5 (99,995% de pureza), de acordo com as seguintes condições de análise: número de purgas: 30; pressão de purga: 19,5 psig; número de repetições (corridas): 30; pressão de preenchimento: 19,5 psig; taxa

de equilíbrio: 0,005 psig/min; porcentagem de variação: 0,05%; temperatura de análise: 22,0 °C. Essa análise foi realizada no Centro do Combustível Nuclear (CCN) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

#### **4.3.5. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO**

Os espectros de absorção na região do infravermelho das cinzas foram obtidos em um aparelho Nexus 670 FTIR da Thermo Nicolet na região de 400 a 4000  $^{\circ}\text{C cm}^{-1}$  alocado no Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM) do IPEN- NEN/SP. Os filmes foram colocados diretamente no porta-amostra e inseridos no aparelho para a obtenção do espectro.

#### **4.3.6. DETERMINAÇÃO DO pH E DA CONDUTIVIDADE DAS CINZAS DE CARVÃO**

Um grama de amostra de cinzas de carvão foi pesado dentro de um béquer de polietileno, onde foram adicionados 100 mL de água deionizada (Milli-Q Plus, Millipore,  $>18 \text{ M cm}^{-1}$ ). A mistura foi agitada por 24 h no agitador mecânico a 120 rpm seguida de centrifugação por 30 min a 2000 rpm. O sobrenadante foi separado do sólido e medições de pH (Quimis modelo Q-400 H -versão 1.06) e condutividade (Digimed CD-20) foram realizadas.

#### **4.3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA**

Para verificação da morfologia, o lodo foi colocado em suporte metálico e pulverizado com uma fina camada de Au para torná-lo condutor e gerar uma imagem de melhor resolução. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo XL30, marca Philips, com aumentos de 50, 53, 54, 430 e 1000x a 30 kV. Essa análise foi realizada no Centro de Ciência e Tecnologia dos Materiais (CCTM) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

#### **4.3.8 TEOR DE UMIDADE**

Para determinar o teor de umidade, colocou-se o lodo em estufa a 110°C por 24h e, após esse período, pesou-se o material resultante comparando-o a

massa inicial. A diferença encontrada indicou a quantidade de perda de água por evaporação (EMBRAPA, 1997).

#### **4.3.9 PERDA AO FOGO**

A análise de perda ao fogo foi realizada de forma similar à umidade, porém utilizando-se mufla à temperatura por 24 h de 1.000 °C. (Oliveira et. al. 2004). Esse ensaio verificou a perda de massa com o processo de calcinação e foi calculado pela equação:

$$PF = \frac{Mi}{Mf} \times 100 \quad (1)$$

onde: PF = perda ao fogo (%); Mi = massa inicial (g); Mf= massa final (g).

#### **4.3.10 DETERMINAÇÃO DE pH DO LODO**

A medição de pH foi feita utilizando-se um Medidor de pH (peagâmetro de bancada, modelo Quimis Q-400 M). A amostra de lodo foi colocada na marca de 10 mL em proveta graduada até 100 mL e foram adicionados 25 mL de água destilada. A suspensão foi agitada com bastão de vidro e deixada em repouso por 1 h. Após o repouso foi agitada novamente com bastão de vidro e feita a leitura do pH (EMBRAPA, 1997).

#### 4.3.11. DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A metodologia adotada para a caracterização granulométrica do lodo seguiu o método de densímetro de Boyoucos (Klute, 1986). O dispersante foi preparado dissolvendo 4 g de NaOH com, aproximadamente, 30 mL de água deionizada num béquer de 150 mL, adicionado 10 g de hexametáfosfato de sódio (HMP) e agitado com um bastão; foi-se adicionando água deionizada e agitando, mecanicamente, durante meia hora e, finalmente, diluído para 1 litro. As duas amostras de lodo foram pesadas com 50 g e colocadas, cada uma, num erlenmeyer de 500 mL, adicionada 250ml de dispersante, agitado durante 16 h no agitador horizontal (shaker) em 170 rpm. Após isso, cada uma das amostras foi transferida, em solução, para uma proveta de 1000 mL e completadas com água da torneira até 990 mL (foi deixado 10 mL para a lavagem do êmbolo após a agitação). A solução “branco” foi preparada numa proveta de 1000 mL com 250 mL de dispersante química adicionada água de torneira até completar 1000 mL. Foi medida a temperatura e a densidade da solução em branco com o densímetro de Boyoucos (este densímetro que fornece a quantidade de argila e silte em gramas).

A solução da amostra utilizando um êmbolo, através de movimentos lentos (para cima e para baixo) de forma que a solução se torne homogênea e, imediatamente após a agitação, iniciou-se a contagem do tempo com o cronômetro e fazendo-se a leitura com o densímetro após 40s e depois após 2 h.

O cálculo da porcentagem de argila, silte e areia foi feito a partir das equações abaixo:

$$\%Argila = \frac{leitura\ 2h - leitura\ do\ branco}{50} \quad (2)$$

$$\%Silte = \frac{(leitura\ 40s - leitura\ do\ branco) - (leitura\ 2h - leitura\ do\ branco)}{50} \quad (3)$$

$$\%Areia = 100 - \%Argila - \%Silte \quad (4)$$

#### 4.3.12. DETERMINAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA

O ensaio foi feito em triplicata, em que se pesou uma cápsula de porcelana vazia em balança analítica de três casas após estabilização da balança após 30 minutos. O lodo foi colocado na cápsula de porcelana e pesada na mesma balança analítica, colocada com a amostra na estufa à 110°C por duas horas (tempo contado a partir da estabilização da estufa na temperatura 110°C, aproximadamente, 15 minutos). A cápsula foi retirada da estufa e deixada esfriar num dessecador por 15 minutos, aproximadamente. Novamente, foi pesada a cápsula na mesma balança utilizada inicialmente e sua massa anotada.

A outra amostra da cápsula foi colocada na mufla à temperatura de 375 °C por quatro horas (este tempo foi contado a partir da estabilização da estufa na temperatura 375 °C, aproximadamente 30 minutos). A mufla foi desligada e a cápsula retirada quando esta registrava uma temperatura de 150°C (aproximadamente 3 horas de resfriamento). A cápsula foi colocada no dessecador para esfriá-la, durante cerca de quinze minutos e pesada na mesma balança analítica utilizada inicialmente, anotando-se a massa (Metodologia adotada com base na norma NBR 13600/96).

O cálculo da porcentagem de matéria orgânica (MO) foi feito a partir da equação:

$$\%MO = \frac{\text{massa do solo seco na estufa} - \text{massa do solo queimado na mufla}}{\text{massa do solo seco na estufa}} \times 100 \quad (5)$$

#### 4.3.13. CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS

Para realização do ensaio foram preparadas as seguintes soluções (EMBRAPA, 1997):

- a) Solução de BaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O 0,05 mol L<sup>-1</sup>: foi dissolvido 12,2 do sal em água deionizada e completado para 1 L
- b) Solução de BaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O 0,002 mol L<sup>-1</sup>: foi diluído 40 mL da solução “a” com água deionizada para 1 L

- c) Solução de  $\text{MgSO}_4$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ : pesou-se 3,1 g e dissolvendo em água deionizada, completando para 500 mL
- d) Solução de EDTA dissódico  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ : foi dissolvido 0,9308 g do sal em água deionizada e completando para 250 mL
- e) Solução tampão de  $\text{NH}_4\text{OH}/\text{NH}_4\text{Cl}$ , pH 10: pesou-se 3,5 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , foi adicionado 28,5 mL de  $\text{NH}_4\text{OH}$  concentrado e completado com água deionizada para 50 mL
- f) Indicador - solução de negro de eriocromo T (NET): foram pesados 0,1 g de NET e dissolvido em 7,5 mL de trielanolamina e adicionado 2,5 mL de etanol para reduzir a viscosidade

Após o preparo das soluções, foi dada sequência ao ensaio em que 1 g de lodo foi pesado e adicionado num tubo Falcon de 50 mL, adicionando 40 mL de solução  $\text{BaCl}_2$   $0,05 \text{ mol L}^{-1}$  com pipeta volumétrica de 40 mL, tampando o tubo e agitando no “shaker” a 170 rpm durante 16 horas. Após agitação no “shaker”, foi centrifugado a 2500 rpm por, aproximadamente, 5 minutos e descartado o sobrenadante. As amostras foram lavadas duas vezes com 20 mL de solução  $\text{BaCl}_2$   $0,002 \text{ mol L}^{-1}$  utilizando uma proveta de 50 mL. As amostras, novamente, foram levadas para agitar no “shaker” a 170 rpm durante 1 hora cada lavagem e centrifugados a 2500 rpm por 5 minutos e descartado o sobrenadante.

À solução de  $\text{MgSO}_4$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  foram adicionado a 20 mL com pipeta volumétrica de 20 mL no tubo e agitado no “shaker” a 170 rpm por 2 h. A solução foi centrifugada a 2500 rpm durante 5 minutos e transferido o sobrenadante para um béquer de 100 mL (extrato final), e descartada a amostra de lodo do tubo. O volume de 5 mL do extrato final foi colocado com uma pipeta volumétrica num béquer de 50 mL e foi adicionando 1 mL da solução tampão de  $\text{NH}_4\text{OH}/\text{NH}_4\text{Cl}$ , pH 10, e 1 gota de indicador de solução de indicador NET. A solução foi titulada com EDTA  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  até o ponto de viragem da cor rosa/violeta para azul.

Na preparação do “branco” foram utilizados 5 mL de  $\text{MgSO}_4$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  num béquer de 50 mL onde foi adicionado 1 mL da solução tampão de  $\text{NH}_4\text{OH}/\text{NH}_4\text{Cl}$ , pH 10, e 1 gota de indicador de solução de

indicador NET. O “branco” foi titulado com solução de EDTA 0,01 mol L<sup>-1</sup> até o ponto de viragem da cor rosa/violeta para azul.

O cálculo da capacidade de troca de cátions (CTC em cmol/kg = meq/100g) foi feito a partir da equação:

$$CTC = 8 (V_{\text{branco}} - V_{\text{amostra}}) \quad (6)$$

#### **4.3.14. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA UTILIZANDO UM CONJUNTO DE PENEIRAS**

O procedimento seguiu a Norma NBR 7181 de dezembro/84 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O lodo de ETA foi adicionado na peneira superior número 10 (abertura 2 mm). Após o período de funcionamento do conjunto de peneiras, realizaram-se pesagens conforme as seguintes etapas: a) o conteúdo de cada peneira e do fundo foi transferido, individualmente, para placas de petri com massas conhecidas e foram determinadas as massas em balança semi-analítica. A massa de lodo retida em cada peneira foi obtida pela diferença. b) a massa do material que passou pela peneira de abertura 0,063 mm foi subtraída da massa total peneirada.

#### **4.3.15. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE**

Para esse teste, utilizou-se um recipiente plástico de 100 mL previamente pesado. O recipiente foi preenchido com lodo de ETA até a marca de 100 mL. Em seguida, o recipiente contendo o lodo foi novamente pesado. A densidade aparente do lodo foi calculada pela Equação 8, na qual a massa do lodo foi obtida pela diferença entre a massa do recipiente cheio e vazio (Mello e Petrovick, 2000).

### **4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO TIJOLO**

#### **4.4.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

A determinação da resistência à compressão foi também realizada aos 28 dias de cura, utilizando-se os tijolos de cada lote, segundo a norma NBR 10836/94, em uma prensa semi-automática digital, marca Skratos

Equipamentos do Laboratório do Instituto Falcão Bauer em São Paulo. Na determinação da resistência à compressão foram adotados os seguintes passos: os tijolos foram serrados ao meio; as duas faces foram unidas com as pontas serradas invertidas; as duas faces foram regularizadas (capeamento) com massa de cimento. As peças foram deixadas em imersão em água por 24 h. Decorrido este tempo, as amostras, foram levadas para a prensa para determinar a resistência à compressão (em MPa).

#### **4.4.2 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA**

Os ensaios de absorção de água dos tijolos foram feitos de acordo com a NBR 10836/94 pelo período de cura de 28 dias.

#### **4.4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DOS TIJOLOS**

Os fragmentos de tijolos gerados nos ensaios de funcionalidade dos artefatos produzidos com adição de resíduo foram submetidos a ensaios de lixiviação e de solubilização, conforme NBR-10005:2004 Lixiviação de resíduos – procedimentos (ABNT, 2004) e de solubilização conforme a norma NBR-10006:2004 Solubilização de resíduos – procedimentos (ABNT2004) para verificação de seu comportamento sob o ponto de vista ambiental.

Os fragmentos dos tijolos analisados foram classificados de acordo com a norma, NBR-10004:2004, Resíduos sólidos – classificação (ABNT, 2004).

#### **4.4.4. AVALIAÇÃO ESTÉTICA**

A avaliação estética foi feita a partir de observações visuais, táteis e olfativas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. CINZAS DE CARVÃO

#### 5.1.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

A Tabela 12 apresenta algumas características obtidas nas análises das cinzas de carvão, sendo os valores uma média de duplicata ou triplicata com desvio padrão.

TABELA 12. Características das cinzas de carvão

Parâmetro	Valor
pH	10,60 ± 0,58
Condutividade ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	454 ± 19
Massa Específica ( $\text{g cm}^{-3}$ )	2,448 ± 0,002
Área Superficial Específica ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	8,569
Perda ao fogo	1,43 ± 0,23
Teor de umidade	5,02 ± 0,25

Testes de lixiviação das cinzas de carvão em água foram realizados para a determinação do pH e da condutividade. O caráter alcalino do lixiviado das cinzas se justifica pela presença dos cátions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ .

Depoi et al., (2008) encontram valores de pH igual  $9,18 \pm 1,54$  para as cinzas leves e  $9,05 \pm 1,02$  para as cinzas pesadas da Usina Termelétrica de Figueira, os quais estão próximos ao valor encontrado para as cinzas leve retidas no filtro ciclone do presente estudo. Os mesmos autores encontram valores de condutividade igual a  $620 \pm 99 \mu\text{Scm}^{-1}$  para as cinzas leves e  $190 \pm 10 \mu\text{Scm}^{-1}$  para as cinzas pesadas, sendo que nos testes de lixiviação foi usada uma relação cinza/água duas vezes maior do que no presente estudo.

Níveis de condutividade entre 300 a 1000  $\mu\text{Scm}^{-1}$  são considerados baixos e estão relacionados com conteúdos baixos de anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) e cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presentes composição na cinza (Umaña-Peña, 2002).

O valor encontrado de massa específica está concordante com a literatura que estabelece que a presença de fases cristalinas como mulita e quartzo apresentam massa específica na faixa de 2 a 2,5  $\text{g cm}^{-3}$  (Hemmings e Berry, 1985). A presença dessas fases será confirmada pelas determinações da composição mineralógica das cinzas de carvão.

Chies et al., (2003) determinaram as massas específicas de cinco amostras diferentes de cinzas pesadas de carvão da região do RS e os valores são próximos ao encontrado para a cinza retida no filtro ciclone da UTF (Tabela 13).

TABELA 13. Resultados das massas específicas de cinzas de carvão

Procedência das cinzas	Massa Específica ( $\text{g cm}^{-3}$ )
Copesul	2,28
Usina Termelétrica Jorge Lacerda	2,10
Charqueadas	2,10
Riocell	2,09
Candiota	2,27

Fonte: Chies et al., 2003

Os valores de massas específicas de cinzas são geralmente mais baixos do que aqueles de solos e esta variação está relacionada com a presença de partículas ocas (cenosferas e plerosferas) com gases inclusos no seu interior (Rohde et al, 2006).

O valor encontrado para área superficial das cinzas foi de 8,569  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ . A análise de 19 cinzas de carvão de diferentes usinas da Espanha mostrou valores entre 1,6 a 12,4  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  com média de 3,6  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  (Umaña-Peña, 2002). Amostras de cinzas pesadas da Usina Jorge Lacerda estavam entre 1,15 a 5,00  $\text{m}^2$

$\text{g}^{-1}$  e da Usina de Charqueadas entre 12,85 a 48,13  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  (Martins, 2008). A variação da área superficial das diferentes cinzas é devido ao tamanho e forma de suas partículas e pela presença de material carbonáceo não queimado, o qual é altamente poroso.

Na Figura 10 é observado o gráfico da distribuição granulométrica feita com laser da cinza volante. Observam-se a distribuição discreta do diâmetro das partículas bem como a distribuição acumulada. Os diâmetros que correspondem à distribuição acumulada nos teores de 10%, 50% e 90% estão listados na Tabela 14.

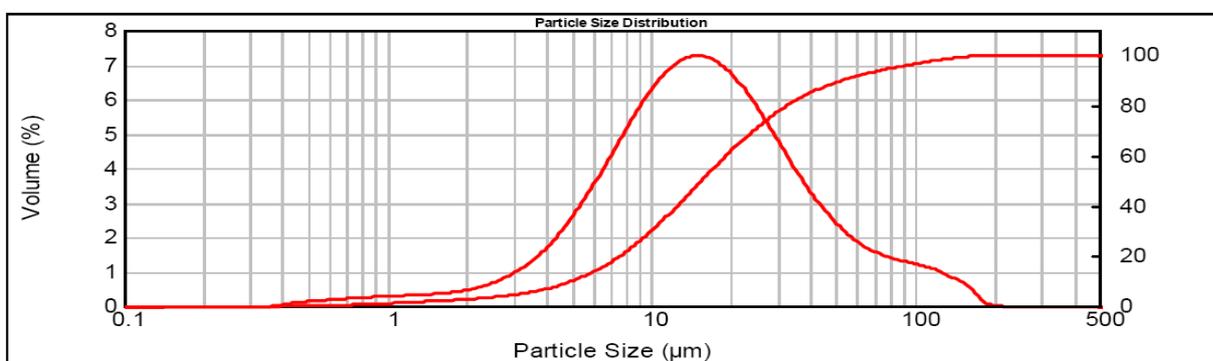


Figura 10. Curvas de distribuição granulométrica das cinzas leves de carvão

TABELA 14. Análise da distribuição granulométrica das partículas para a cinza

Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas ( $\mu\text{m}$ )	4,994
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 50% das partículas ( $\mu\text{m}$ )	15,475
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas ( $\mu\text{m}$ )	52,526

O intervalo do tamanho de partículas estimado foi entre 0,399 a 200  $\mu\text{m}$ . O diâmetro médio encontrado para cinzas volantes da Usina Termelétrica de Candiota foi de 49,30  $\mu\text{m}$  (Pires e Querol, 2004).

### 5.1.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Na Tabela 15 é apresentada a composição química das cinzas leves de carvão obtidas por FR-X. Os principais constituintes do material são o óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a

sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Os outros compostos encontram-se em quantidades menores que 3 %.

Tabela 15 Composição química das cinzas leves de Carvão

Óxidos	% em massa	Óxidos	% em massa
$\text{SiO}_2$	53,5	$\text{SiO}_2$	53,5
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20,6	$\text{Al}_2\text{O}_3$	20,6
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8,14	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8,14
$\text{SO}_3$	2,77	$\text{SO}_3$	2,77
$\text{K}_2\text{O}$	2,75	$\text{K}_2\text{O}$	2,75
$\text{CaO}$	2,23	$\text{CaO}$	2,23
$\text{MgO}$	1,17	$\text{MgO}$	1,17
$\text{TiO}_2$	1,10	$\text{TiO}_2$	1,10
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,12	$\text{P}_2\text{O}_5$	0,12
$\text{Na}_2\text{O}$	0,97		
PF	6,21		

PF= perda ao fogo

Um alto teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , segundo Cheriaf e Rocha (1997), está relacionado principalmente à presença de sulfeto (pirita e marcassita) nos carvões minerais.

Levandowski e Kalkreuth, 2009 analisaram o carvão e as respectivas cinzas geradas na Usina Termelétrica de Figueira. Os resultados indicaram que o carvão é do tipo betuminoso alto volátil B/C. As amostras de cinzas leves retidas no filtro ciclone apresentaram as seguintes faixas de teores dos elementos principais de maior concentração (% em massa): 54,25-56,00 de  $\text{SiO}_2$ , 15,84-19,90 de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 11,98-17,60 de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Depoi et al, 2008 determinaram a concentração dos óxidos dos elementos para a amostra de uma mistura homogênea de cinzas leves retidas no filtro manga e no filtro ciclone da Usina Termelétrica de Figueira. Os

resultados encontrados foram (expressos em porcentagem em massa): 56,5 para  $\text{SiO}_2$ , 21,1 para  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 11,9 para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

De acordo com a classificação da American Society for Testing Materials (ASTM C618-05), as cinzas utilizadas neste estudo estão incluídas dentro do grupo F. Este grupo possui propriedades pozolânicas e são caracterizados por  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$  e  $\text{CaO}$  entre 1-12%. As cinzas de carvão da classe F são comumente produzidas pela queima de carvão betuminoso, sub-betuminoso ou antracito.

Segundo Petrucci, 1993, pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, sem ou com pouco valor como aglomerante que, finamente moídos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e formam compostos com propriedades aglomerantes. Além da ação química, as pozolanas possuem ação física, atuando como material de enchimento (filler), produzindo um arranjo mais eficiente na interface agregado-pasta de cimento, reduzindo a segregação e aumentando a densidade e homogeneidade dessa zona de transição (Baronio e Binda, 1997).

### 5.1.3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

O difratograma das cinzas de carvão apresentado na Figura 11 indica a presença de quartzo, mulita, hematita, anidrita e albita. As fases cristalinas identificadas bem como seus padrões de difração e fórmulas químicas estão listados na Tabela 16.

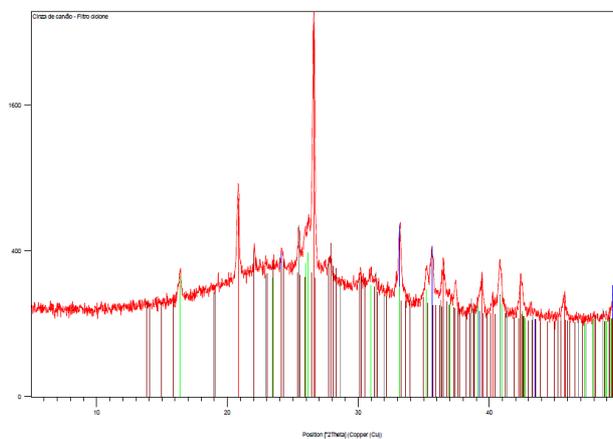


Figura 11. Difratograma das cinzas de carvão

TABELA 16 – Fases cristalinas i-identificadas nas cinzas de carvão

<b>Fases cristalinas</b>	<b>Padrão de difração</b>	<b>Fórmula química</b>
<b>ICDD</b>		
Quartzo	01-083-2465	SiO <sub>2</sub>
Mulita	01-073-1389	Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>
Hematita	01-087-1164	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Anidrita	01-072-0916	CaSO <sub>4</sub>
Albita	01-074-0603	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>

As cinzas de carvão, em geral, apresentam como forma cristalina principal o quartzo. Essa tendência foi seguida pelas cinzas do presente estudo. A formação de mulita está relacionada com a combustão do carvão mineral em temperaturas acima de 1050°C. A combustão do carvão mineral na UTF é realizada a 1400°C, fato que explica a formação da mulita (Ferret, 2004).

O carvão mineral que é extraído da mina de carvão que alimenta a UTF é rico em pirita (FeS<sub>2</sub>) e, muito embora a etapa de beneficiamento do carvão tente removê-lo, o carvão queimado continua com quantidades significativas desse mineral. Durante a combustão na usina, a pirita presente no carvão reage com o oxigênio segundo a reação:



A presença de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), portanto, se deve à reação da pirita com oxigênio mostrada na reação acima.

Estudos anteriores mostraram que a composição mineralógica das amostras de cinzas leve retidas no filtro ciclone da Usina termelétrica de

Figueira era composta predominantemente por quartzo, mulita e hematita (Levandowski e Kalkreuth, 2009).

#### **5.1.4. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA**

Na Figura 12 podem ser observadas microfotografias das cinzas de carvão que apresenta partículas heterogêneas com diferentes diâmetros e formas.

As esferas de superfície lisa são normalmente de composição silicoaluminosa. Os formatos irregulares são características de carvão incombusto e de partículas amorfas que sofreram difusão em intercontato com outras partículas ou rápido resfriamento (Fig. 12A e 12B).

É possível visualizar esferas ocas contendo outras pequenas esferas no seu interior (plenosferas) e esferas ocas e vazias (cenoferas) nas Fig 12C e 12D. As cenoferas são formadas pela expansão dos gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  que saem dos minerais do carvão que está sendo queimado (Fisher et al, 1976). A plenosfera expõe pequenas esferas como consequência de um quebra ou dissolução de parte da carapaça de uma esfera grande. Há também a probabilidade que as plenosferas estejam vazias antes da quebra e são progressivamente preenchidas com pequenas esferas durante o processo de coleta das cinzas volantes.

Dados de literatura mostraram estruturas semelhantes para cinzas volantes de outros países (Gross et al., 2007; Vassilev et al., 2003) e para cinzas volantes brasileiras (Paprocki, 2009; Ferret, 2004).

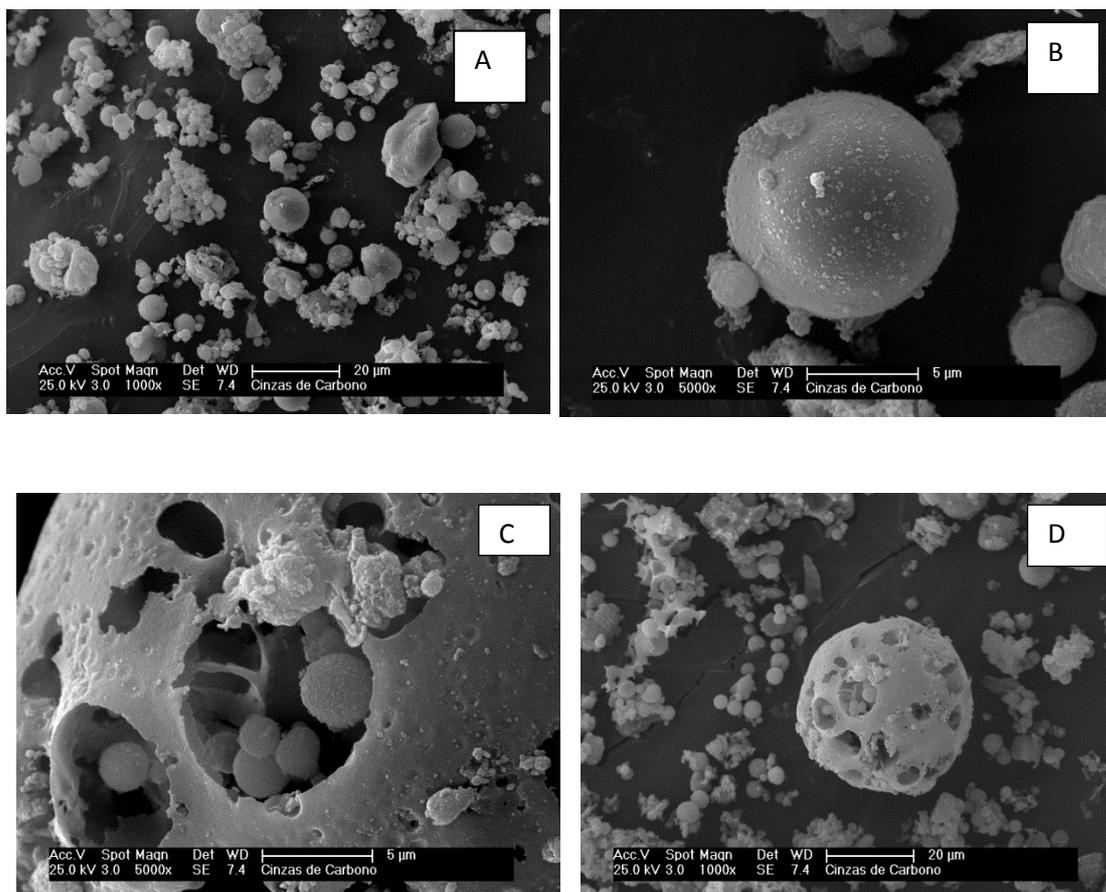


Figura 12. Imagens por MEV mostrando as diferentes morfologias encontradas para as partículas contidas nas cinzas: (A) formatos irregulares de carvão incombusto; (B) esféricas; (C) e (D) plenosferas e cenosferas.

#### 5.1.5. ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO

Na Figura 13 é mostrado o espectro de infravermelho obtido para as cinzas de carvão. As atribuições destas bandas encontram-se na Tabela 17.

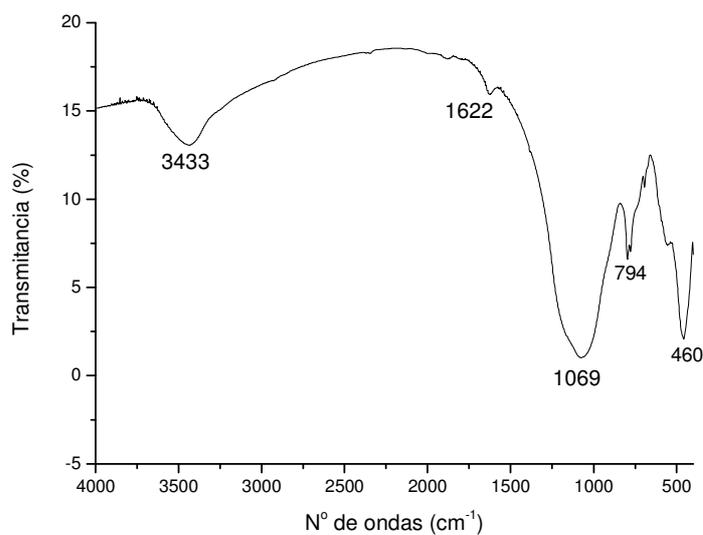


Figura 13. Espectro de infravermelho das cinzas de carvão

TABELA 17. Atribuições das bandas do espectro Infravermelho das cinzas de carvão. T =Si ou Al e O =Oxigênio

	Atribuição	Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )
O-H	estiramento simétrico e assimétrico	3433
H <sub>2</sub> O	modo de vibração de flexão da molécula de H <sub>2</sub> O	1622
→OTO→	estiramento assimétrico das ligações	1069
←OTO→	estiramento simétrico	794
T-O	deformação angular da sílica amorfa	460

As cinzas leves de carvão são constituídas principalmente de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) e sílica amorfa. A banda em  $3433\text{ cm}^{-1}$  é atribuída às vibrações simétricas e assimétricas,  $\nu(\text{O-H})$ , sugerindo a presença de material silicato amorfo (vidro) ou possivelmente silicatos de alumínio hidratado. A banda em  $1622\text{ cm}^{-1}$  pode ser atribuída à presença do modo de vibração de flexão da molécula de  $\text{H}_2\text{O}$  (Mouhtariss et al, 2003).

As bandas em  $1069\text{ cm}^{-1}$  e  $460\text{ cm}^{-1}$  são características das vibrações internas no tetraedro  $\text{TO}_4$  ( $\text{T} = \text{Al, Si}$ ) e estão associadas às vibrações de estiramento assimétrico e deformação angular T-O, respectivamente. Estes tetraedros são as unidades básicas de construção da mulita, quartzo e sílica. A larga banda de absorção próxima a  $1069\text{ cm}^{-1}$  é resultante da sobreposição das bandas da mulita, do quartzo e da sílica. O pico em  $794\text{ cm}^{-1}$  é correspondente ao quartzo e em  $460\text{ cm}^{-1}$  corresponde à sílica. (Paprocki, 2009).

## 5.2. LODO DE ETA

### 5.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

As Tabelas 18, 19 e 20 apresentam algumas características importantes obtidas nas análises do resíduo de ETA. Os resultados são os valores médios de duplicatas ou triplicatas com o respectivo desvio padrão.

TABELA 18. Características do lodo de ETA

Parâmetro	Valor
Teor de umidade (%)	$85,0 \pm 1,48$
Perda ao Fogo (%)	$52,0 \pm 4,41$
pH	$5,57 \pm 0,115$
CTC (cmol/Kg)	$9,34 \pm 0,656$
Teor de Matéria Orgânica (%)	$24,3 \pm 3,16$
Densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ )	$1,75 \pm 0,02$
Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	$2,27 \pm 0,001$
Área superficial específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	106,9413

CTC= capacidade de troca cationica

TABELA 19. Resultado dos sólidos do lodo de ETA

<b>ST</b> (g/Kg)	<b>ST</b> (%)	<b>SF</b> (g/Kg)	<b>SF</b> (%)	<b>SV</b> (g/Kg)	<b>SV</b> (%)
985± 1,31	9,85± 0,01	216± 0,78	2,16± 0,01	769±1,02	0,08± 0,01

ST=Sólidos Totais; SF=Sólidos Fixos; SV= Sólidos Voláteis

TABELA 20. Composição granulométrica do lodo de ETA

Fração	Conteúdo (%)
Areia	58,2 ± 0,325
Argila	35,1 ± 0,164
Silte	6,83 ± 0,240

Nas Tabelas 7, 8 e 21 encontram-se as principais características de amostras de lodo de ETA relatadas em literatura. A umidade do lodo centrifugado da ETA de Passaúna estava em torno de 87% (Portella et. al. 2003). A umidade do lodo da ETA de Duas Bocas estava em torno de 94,25% (Ferreira et. al. 2009). Esses valores são próximos ao encontrado no lodo estudado.

Segundo o Relatório final contendo os resultados da análise de sete lodos de ETA, o ensaio da perda ao fogo apresentou valores entre 30 e 60% (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI Mario Amato, 2006). O valor obtido para o lodo do presente estudo está dentro dessa faixa.

Para Santos (1997), a perda de massa do lodo após a calcinação é decorrente da eliminação de água adsorvida, hidroxilas, decomposição de alguns materiais constituintes e matéria orgânica.

O pH (em água) do resíduo pode ser considerado como sendo levemente ácido. O valor de pH de 5,57 está próximo da faixa característica de pH para lodo de ETA que clarifica a água com sulfato de alumínio conforme Tabela 7 (Richter, 2001). O valor de pH está também dentro dos valores encontrados nos estudos relatados na Tabela 8 (Dayton e Basta, 2001).

A capacidade de troca catiônica (CTC) do resíduo foi da ordem de 9,04 meq/100 g. Este valor está dentro da faixa usual de valores de CTC para a caulinita (3 até 15 meq/100 g). No caso da caulinita, o processo de troca ocorre predominantemente nas faces dos cristais e deve-se principalmente às ligações quebradas (Oliveira et. al. 2004).

TABELA 21. Resultados do Relatório final contendo os resultados da análise de sete lodos de ETA nomeados como L1 a L7 (ESCOLA SENAI MARIO AMATO, 2006)

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Óxidos (%)*							
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,96	42,69	87,64	36,86	81,23	31,41	42,69
CaO	0,14	0,04	0,24	0,63	0,72	0,16	0,04
Sólidos (g/Kg)							
Fixos	204	245	198	269	270	187	245
Totais	119,73	158	112	93	103	125	158
Voláteis	84,27	87	86	176	167	62	87
Granulometria (µm)							
d <sub>50</sub>	20	43	10	14	18	14	43
d <sub>10</sub>	7		2,8	3,8	3	2,5	17
d <sub>90</sub>	30		35	40	45	40	150
DR-X	Quartzo	Quartzo	Quartzo	Quartzo	Quartzo	Quartzo	Quartzo
	Caulinita	Caulinita Gibsita	Goetita	Caulinita	Goetita	Caulinita	Caulinita
					Hematita	Gibsita	Gibsita
						Halosita	Halosita

O teor de matéria orgânica encontrado foi de 24,33% e está dentro da faixa característica de matéria orgânica para o lodo de ETA (Richter, 2001).

A densidade aparente encontrada foi de  $1,75 \text{ g/cm}^3$ , Segundo Richter (2001), na estimativa de volume de lodo gerado em estações de tratamento de água, pode adotar como densidade dos sólidos secos o valor médio de  $1800 \text{ kg/m}^3$  ( $1,8 \text{ g/cm}^3$ ), o valor está próximo ao encontrado no lodo de ETA objeto de estudo.

O valor da massa específica encontrada no lodo de ETA foi de  $2,27 \pm 0,001 \text{ g cm}^{-3}$  e está próximo àqueles encontrados por Dias et. al., 2002 (Tabela 22).

TABELA 22. Massas específicas de 06 tipos de lodo de ETA

AMOSTRAS	MASSAS ESPECÍFICAS
FURO 01	$2,556 \text{ g/cm}^3$
FURO 02	$2,567 \text{ g/cm}^3$
FURO 03	$2,548 \text{ g/cm}^3$
FURO 04	$2,559 \text{ g/cm}^3$
FURO 05	$2,553 \text{ g/cm}^3$
FURO 06	$2,559 \text{ g/cm}^3$
VALOR MÉDIO	$2,556 \text{ g/cm}^3$

Fonte: Dias et. al. 2002

O valor da área superficial específica encontrado no lodo de ETA foi de  $106,9413 \text{ m}^2/\text{g}$  indicando um material com características porosas. O lodo da Estação de Tratamento de Água da empresa de celulose CENIBRA apresentou área superficial de  $47,1 \text{ m}^2/\text{g}$  (Wolff et. al., 2005).

Na Tabela 21, os resultados da análise de sete lodos de ETA mostraram que os Sólidos Fixos (SF) variam entre 1,87 a 2,45% e os Sólidos Voláteis (SV) variam entre 6,2 a 17,6%.

Segundo Barbosa et. al., 2000 os Sólidos Totais variam de 5,74 a 52,34%, os Sólidos Fixos variam de 3,87 a 39,07%, os Sólidos Voláteis variam de 0,06 a 0,1%. Os valores estão próximos ao encontrado no lodo do presente estudo.

Na Tabela 20 encontra-se a composição granulométrica do lodo de ETA. Segundo Teixeira et. al., 2006, amostras de lodo apresentam variações em sua composição de acordo com a época (seca ou chuva) que forem coletadas. Portanto, uma comparação de resultados não é possível.

### 5.2.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Um ensaio de granulométrica por peneiramento e sedimentação, segundo a NBR 7181/84, foi realizado para a caracterização física do lodo. Os resultados estão apresentados na Tabela 23 e Figura 15.

TABELA 23. Distribuição granulométrica do lodo de ETA

Tara das peneiras	Peneiras vazias sem fundo	Nome do material	Granulometria mm	Peneiras com amostra + fundo	Peneiras com amostra sem fundo	Massa (g)	Massa corrigida (g)	Porcentagem (%)
						Massa inicial	100	
10	860,81	388,02	Grânulos > 2,0	911,63	436,6	42,27	40,60	40,60
18	899,85	427,06	Areia muito grossa 2,0 a 1,0	921,20	446,17	20,43	19,60	19,60
35	894,66	421,87	Areia grossa 1,0 a 0,5	909,72	434,69	14,50	13,91	13,91
60	817,82	345,03	Areia média 0,5 a 0,25	828,50	353,47	9,69	9,29	9,29
120	811,73	338,94	Areia fina 0,25 a 0,1250	820,98	345,95	8,09	7,76	7,76
230	807,07	334,28	Areia muito fina 0,125 a 0,063	814,77	339,74	6,44	6,18	6,18
fundo	472,79	472,79	Silte grosso < 0,063	475,03	475,03	2,80	2,68	2,68
Totais						104,2	100,00	100,00

Fator de correção: 0,959785

Os valores encontrados na Tabela 23 em conjunto com os dados da Tabela 20 e a Figura 14 permitem concluir que: a areia (58,23%) é formada por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm; o silte (6,83%) é formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm e a argila (35,16%) possui

gradação fina constituída por partículas com dimensões menores que 0,002 mm (NBR 6502/95).

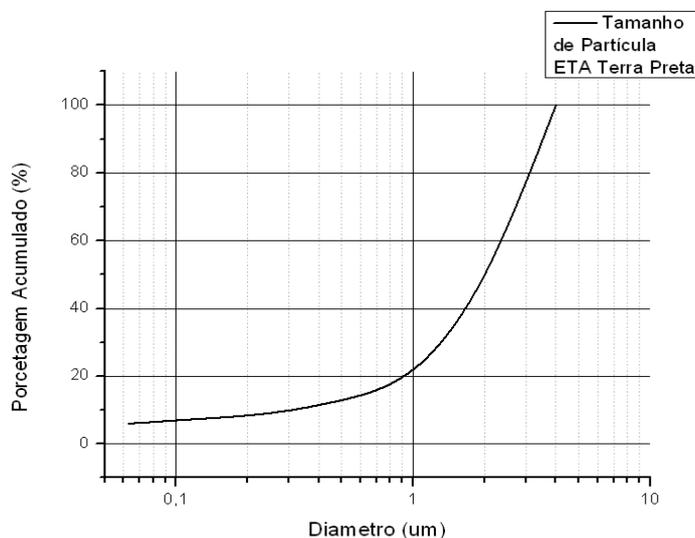


Figura 14. Distribuição granulométrica da amostra do lodo de ETA

Na Figura 15 são mostradas as escalas granulométricas adotadas pela (A.S.T.M.) American Society for Testing and Materials, (A.A.S.H.T.O) American Association of State Highway Transport Officials, (M.I.T.) Massachusetts Institute of Technology e (ABNT) Associação Brasileira de Normas Técnicas (Quintans, 2008).

#### Tamanho (mm)

AUTOR	Diametro dos grãos (mm)			
	100	10	1	0,1
				0,01
				0,001
UNIFIED	Pedregulho	Areia	Finos (argila e silte)	
	75	4,75	0,075	
AASHTO	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
	75	2	0,05	0,002
MIT	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
	60	2	0,06	0,002
ASTM	Pedregulho	Areia	Silte	
	60	4,75	0,075	0,002
USDA	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
	60	2	0,05	0,002
DNIT	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
	60	2	0,075	0,005
ABNT	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
	60	2	0,074	0,002

Figura 15. Escalas granulométricas (Adaptado de: Rodrigues, 1998)

Os dados granulométricos do resíduo de ETA foram localizados no Diagrama de Winkler (Pracidelli e Melchiades, 1997), como é mostrado na Figura 16.

Este diagrama ternário é baseado no tamanho de partículas das formulações argilosas, onde os vértices representam diferentes faixas de tamanhos ( $< 2 \mu\text{m}$ ;  $2-20 \mu\text{m}$ ;  $> 20 \mu\text{m}$ ). Além do mais, este diagrama mostra as regiões mais adequadas do ponto de vista granulométrico para obtenção de produtos de cerâmica vermelha. Estas regiões são: região A - material de qualidade; região B - telhas; região C – tijolos furados; e região D - tijolos maciços. Os produtos de maior qualidade necessitam de uma massa argilosa rica na fração  $< 2 \mu\text{m}$ . No entanto, em todos os casos a presença de material não plástico ( $> 20 \mu\text{m}$ ) em quantidades adequadas é essencial. Os materiais não plásticos são responsáveis pela menor plasticidade da massa argilosa e retração dimensional durante o processo de fabricação.

A Tabela 24 apresenta as mesmas informações do Diagrama e de acordo com os resultados, o lodo analisado, conforme indicado na Figura 17, que contém em sua composição alta concentração de areia e argila, apresentou composição granulométrica ideal para fabricação de tijolos maciços.

TABELA 24. Composição granulométrica ideal para produtos da cerâmica vermelha, de acordo com o diagrama de Winkler

Regiões	Composição granulométrica (%)			
	Tipos de produto	2 $\mu\text{m}$	2 a 20 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
A. Materiais de qualidade com dificuldade de produção		40 a 50	20 a 40	20 a 30
B. Telhas, capas		30 a 40	20 a 50	20 a 40
C. Tijolos furados		20 a 30	20 a 55	20 a 50
D. Tijolos maciços		15 a 20	20 a 55	25 a 55

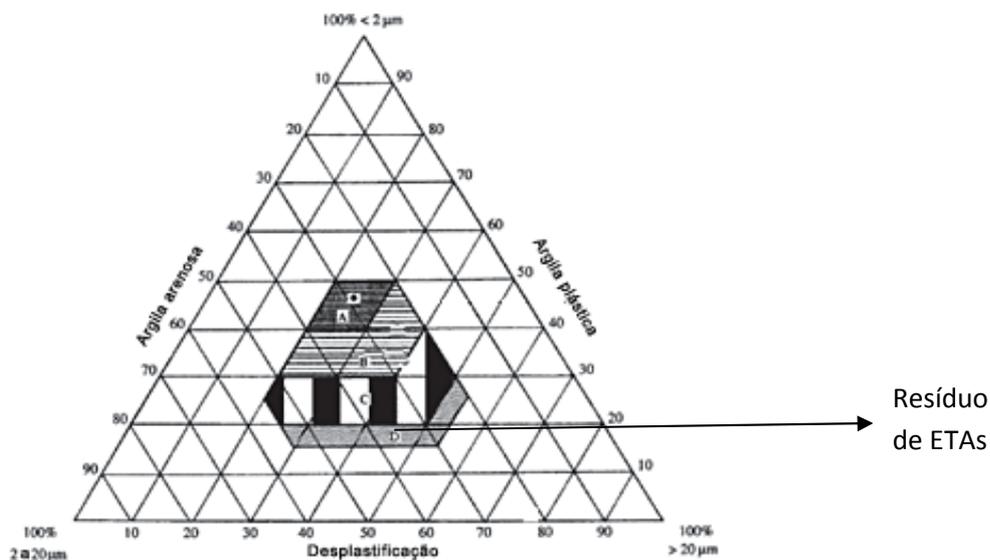


Figura 16. Classificação granulométrica para amostra do resíduo de ETA de acordo com o diagrama de Winkler

### 5.2.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Tabela 25 mostra os resultados da composição química da amostra do resíduo de ETA. Do ponto de vista químico, o resíduo é constituído basicamente por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que correspondem à cerca de 95,1% do material em massa. Este é um resultado similar ao que foi constatado na literatura (Cordeiro, 2001; Santos 1997). Os teores de óxido alcalino ( $\text{K}_2\text{O}$ ), alcalinos terrosos ( $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ ),  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  estão entre 0,2 -1,4 %. A presença destes elementos é justificada pelo uso do coagulante de sulfato de alumínio no tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como por exemplo, a areia e materiais argilosos.

Segundo Santos et. al. (2005) o resíduo tem em seus principais constituintes valores semelhantes aos das argilas normalmente usadas como matéria-prima de produtos cerâmicos.

TABELA 25. Composição química dos elementos principais presentes no lodo de ETA

ELEMENTO	% em massa	ELEMENTO	% em massa
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39,1 ± 0,5	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0,05 ± 0,01
SiO <sub>2</sub>	30,2 ± 0,5	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04 ± 0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,8 ± 0,5	ZnO	0,03 ± 0,01
K <sub>2</sub> O	1,4 ± 0,3	NiO	0,02 ± 0,01
TiO <sub>2</sub>	1,4 ± 0,3	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,018 ± 0,005
MgO	0,6 ± 0,1	Br	0,018 ± 0,005
SO <sub>3</sub>	0,6 ± 0,1	CuO	0,016 ± 0,005
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3 ± 0,1	ZrO <sub>2</sub>	< 0,010
MnO	0,3 ± 0,1	Rb <sub>2</sub> O	< 0,010
CaO	0,2 ± 0,1	SrO	< 0,010
Cl	0,09 ± 0,01		

#### 5.2.4. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

Os gráficos da análise termogravimétrica (ATG) e da derivada termogravimétrica (DTG) do lodo de ETA são apresentados na Figura 17. Os resultados apresentados na análise de ATG mostraram uma perda de massa total no aquecimento de 1440 °C de aproximadamente 32 % devido à eliminação de água adsorvida, hidroxilas, decomposição de alguns materiais constituintes e matéria orgânica (Santos, 1997).

A análise da derivada da curva de perda de massa, entre 25 °C a 1400 °C apresentou três incidências no aumento da taxa de perda de massa: 12% até 203 °C; 8,4% até 397 °C e 9,9% até 906 °C.

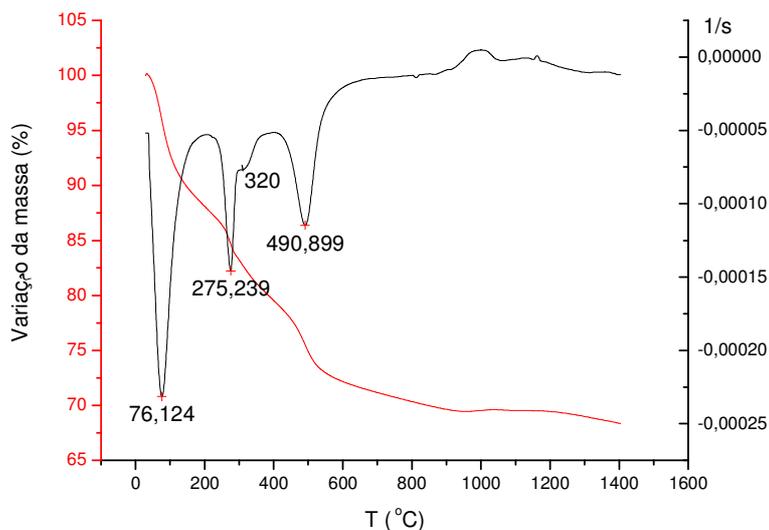


Figura 17. Análise termogravimétrica (ATG e DTG) do lodo de ETA

A curva obtida no DTG apresentou 4 picos. O primeiro evento em 76 °C corresponde à remoção de água fisicamente adsorvida tipicamente observada em materiais argilosos. O segundo evento térmico em 275 °C está provavelmente relacionado à desidratação de hidróxidos existentes, tais como gibsita e goetita. O pico em 320 °C, o qual não está associado a qualquer perda de massa, indicou a presença de gibsita e/ou decomposição de matéria orgânica.

Segundo Reed (1995), o sulfato de alumínio, utilizado como floculante no processo de tratamento de água onde o lodo do presente estudo foi gerado, perde água quimicamente ligada por volta de 300 °C, porém este pico não foi identificado e este fato pode estar relacionado com a existência dos dois fenômenos muito próximos, no caso em 275 °C e 320 °C.

O pico em 490 °C, de acordo com Santos (1989), o vale endotérmico na temperatura de 491 °C está associado principalmente à desidroxilação da caulinita, levando à formação de metacaulinita.

### 5.2.5. ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO

Na Figura 18 é mostrado o espectro de infravermelho obtido para o lodo de ETA. Os grupos identificados trazem informações relativas à presença de caulinita, quartzo, goethita e muscovita.

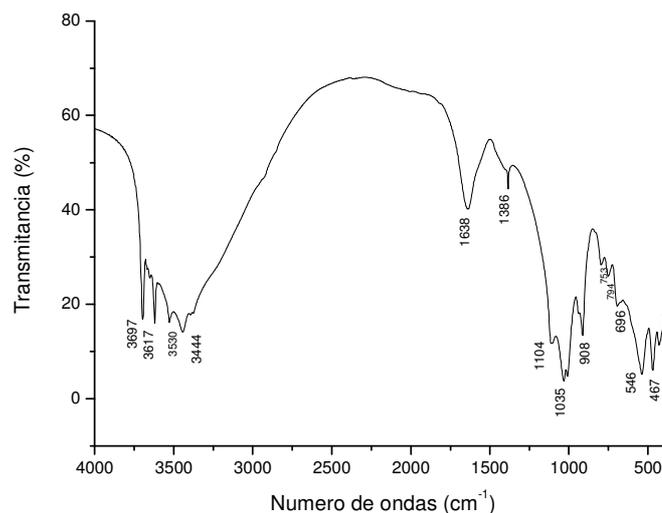


Figura 18. Espectro de infravermelho do lodo de ETA

### 5.2.6 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

As imagens do MEV, Figura 19, mostram grãos com formatos irregulares e tamanhos variados, havendo a presença de elementos de composição química diferenciada.

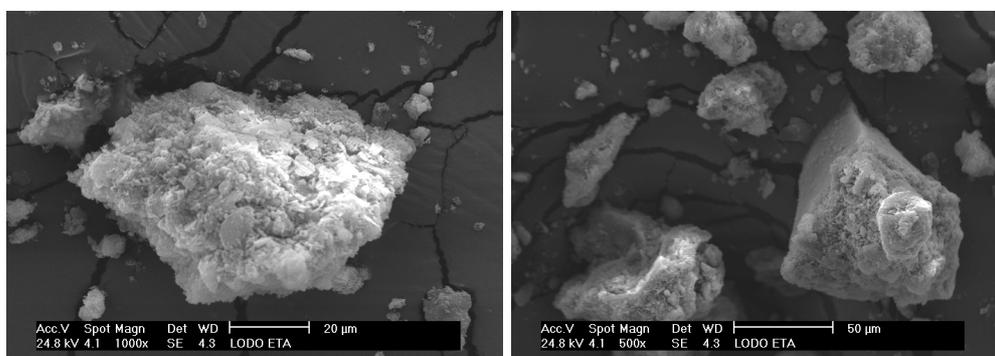


Figura 19. Morfologia do lodo de ETA obtido por microscopia eletrônica de varredura

### 5.2.7. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

O difratograma, Figura 20, apresenta picos característicos de fase cristalina, podendo-se dizer que há predominância de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), argilominerais do grupo das caulinitas ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e muscovita ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ).

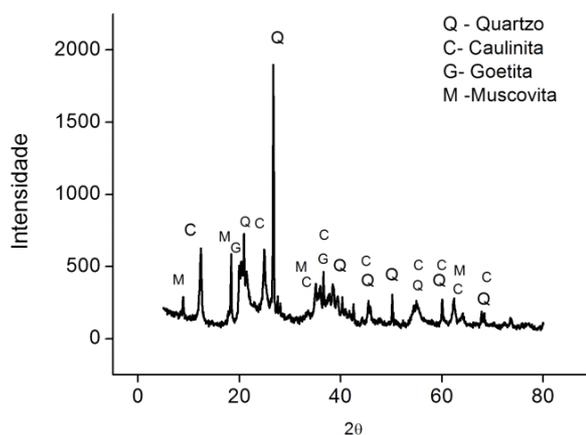


Figura 20. Difratograma do lodo de ETA

## 5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS TIJOLOS

### 5.3.1. ENSAIOS DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Segundo a NBR 10836/94, as condições específicas para tijolos de solo-cimento são: (1) resistência à compressão: as amostras ensaiadas devem ter média dos valores  $> 2,0 \text{ MPa}$  ( $20 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ); (2) valores individuais  $> 1,7 \text{ MPa}$  ( $17 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ) aos 28 dias de idade; (3) absorção de água: as amostras ensaiadas devem ter média dos valores  $< 20\%$  e os valores individuais  $< 22\%$ , aos 28 dias de idade; Idade dos corpos de prova: idade mínima deve ser de sete dias.

As Tabelas 26 e 27 apresentam os resultados individuais dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água dos tijolos dos lotes 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 mostrados nas Figuras 21 a 26. O lote 5 é formado por tijolos de solo-

cimento típicos, onde os valores de resistência à compressão e de absorção de água foram utilizados para comparação com os valores dos tijolos confeccionados com incorporação de resíduos.

Como pode ser observado, nos lotes 1 e 2, os tijolos produzidos não atenderam ao requisito da norma brasileira de qualidade em relação à resistência à compressão. Haviam sido preparados 3 tijolos em cada lote para que os resultados apresentados fossem um valor médio. No entanto, devido ao resultado negativo, apenas um tijolo de cada lote foi testado. Pelo mesmo motivo, o ensaio absorção de água não foi realizado nos tijolos dos lotes 1 e 2.

TABELA 26. Resistência à compressão dos tijolos

Tijolo	Dimensões do tijolo (mm)			Área (mm <sup>2</sup> )	Carga lida (tf)	Resistênc ia (MPa)
	Altur a	Compriment o	Largur a			
Lote 1	48	200	101	20200	-	-
Lote 2	48	200	101	20200	1,44	0,7
Lote 3	48	200	101	20200	1,44	1,6
Lote 4	48	200	101	20200	1,44	2,0
Lote 5	48	200	101	20200	1,44	4,4
Lote 6	48	200	101	20200	1,44	2,10
Lote 7	48	200	101	20200	1,44	1,5

TABELA 27. Absorção de água dos tijolos

Tijolo	Dimensões do tijolo (mm)			Área (mm <sup>2</sup> )	Absorção 28 dias (%)
	Altur a	Compriment o	Largur a		
Lote 1	48	200	101	20200	-
Lote 2	48	200	101	20200	-
Lote 3	48	200	101	20200	22,7
Lote 4	48	200	101	20200	20,4
Lote 5	48	200	101	20200	14,7
Lote 6	48	200	101	20200	14,30
Lote 7	48	200	101	20200	17,30

Os tijolos dos lotes 3, 4 e 7 apresentaram valores individuais de resistência à compressão e absorção de água dentro dos parâmetros da NBR 10836/94. Porém, os valores da média de três ensaios ficaram abaixo dos parâmetros exigidos. Apenas o tijolo do lote 6 (Tabela 28) atendeu esses mesmos parâmetros tanto individualmente, quanto na média.

TABELA 28. Média e desvio da resistência à compressão e absorção de água do tijolo do lote 06.

Lote 06	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
1	2,10	15,00
2	2,00	14,60
3	2,00	14,30
Média	2,03 ±0,06	14,63±0,35

Provavelmente, o tijolo de lodo/cinza (lote 1) produzido não atendeu o requisito da resistência à compressão porque o lodo utilizado apresentava partículas graúdas em relação às partículas de solo que são, normalmente, utilizadas na confecção dos tijolos de solo/cimento.

No caso do tijolo lodo/cinza/cimento/solo (lote 2) também houve o problema da granulometria do lodo ser inadequada e, além disso, supõe-se que deveria haver na mistura maior na quantidade de cimento.

Segundo NBR 10832/92, a qualidade dos tijolos do tipo solo-cimento depende fundamentalmente do tipo de solo empregado, sua granulometria e composição química; da umidade de moldagem; do tipo de prensa usada na fabricação; do tipo e percentagem do estabilizante; do tempo de cura.

Em geral, espera-se que a plasticidade do material não deva ser excessiva e não ultrapasse o limite de 45% e sua composição granulométrica esteja nas faixas de: argila de 10% a 20%, silte de 10% a 20% e areia de 50 a 70%. Para material muito argiloso, com limites de liquidez e plasticidade altos, deve-se misturá-lo com areia em proporção adequada.



Figura 21. Tijolo de cinza e lodo- lote 01



Figura 22. Tijolo de cinza/ lodo/cimento/solo- lote 02



Figura 23. Tijolos de cinza/lodo/cimento/solo - lote 3 (frente) e tijolo de cinza/cal/lodo/solo - lote 04 (atrás)



Figura 24. Tijolo de solo/cemento - lote 05



Figura 25. Tijolos de cinza/lodo/cimento/solo - lote 06



Figura 26. Tijolos de cinza/lodo/cal/solo - lote 07

A análise da composição química das cinzas de carvão utilizadas neste estudo mostrou que o material pertencia ao grupo que possui propriedades pozolânicas. As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que finamente moídos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades aglomerantes. Assim, é possível supor que a adição de hidróxido de cálcio nos tijolos lodo/cinza possa melhorar as suas características de resistência.

Chies et. al (2003) produziram blocos e tijolos à base de amostras de cinzas de fundo de carvão, cal hidratada e água. A mistura ótima é aquela que utiliza o menor teor de cal e atende às especificações técnicas estabelecidas pela ABNT. Para todas as cinzas de fundo estudadas, a proporção de 10% de cal e 90% de cinza de fundo pode ser considerada adequada. A cura dos tijolos foi durante 20 dias.

Andrade (1991) realizou um estudo de desempenho quanto à resistência, absorção, durabilidade e aderência de tijolo de cinza volante e cal. Os ensaios realizados mostraram um crescimento da resistência à compressão do corpo-de-prova com o aumento da proporção de cal na mistura, mas, quando a proporção de cal alcançava uma quantidade em torno de 15 a 20%, os ganhos de resistência do material praticamente cessavam. Portanto, a

respeito da resistência dos tijolos cinza, cal e areia, verificou-se que o período de cura e o teor de cal adicionado à mistura tinham influência na resistência à compressão dos mesmos. À medida que aumentou o tempo de cura dos tijolos, cresceu a sua resistência e, quanto maior o teor de cal, até o limite de 20%, maior foi a resistência do tijolo.

Silva (2009) avaliou a viabilidade de incorporação de lodo de Estações de Tratamento de Água em tijolos de solo-cimento. Os tijolos foram confeccionados a partir dos percentuais de 3%, 5%, 8% e 10% de lodo incorporado na massa de solo-cimento-cal em prensa manual modelo Sahara, com umidade próxima da ótima, a qual foi determinada através do teste do "bolo". Concluiu-se que é possível incorporar até 5% de lodo em tijolos de solo-cimento em condições de campo sem comprometer suas características construtivas.

De acordo com os resultados negativos obtidos nos lotes 1 e 2, concluiu-se que seria necessário adicionar areia e melhorar o processo de homogeneização para obedecer às recomendações da literatura na mistura de solo-cinza-cimento-lodo, para mudar a granulometria e aumentar a resistência à compressão do tijolo (Silva 2009) e no lote 3 aumentar a quantidade de cimento em relação à massa dos outros componentes.

Os tijolos constantes no lote 6 foram os únicos que atenderam os requisitos mínimos quanto à compressão e à absorção de água. Esse fato ocorreu provavelmente porque na confecção desse lote foi usada uma maior quantidade de material aglutinante (cimento) e em conjunto foi empregado um modo de mistura dos materiais mais eficiente do que nos outros lotes.

### **5.3.2 AVALIAÇÃO ESTÉTICA**

Quanto aos aspectos visuais, a NBR 7170 (ABNT, 1983b) recomenda que os tijolos não devam apresentar defeitos sistemáticos tais como trincas, quebras, superfícies irregulares, deformações e desuniformidade na cor. Nesses quesitos, bem como nos quesitos cor e odor, os exemplares confeccionados com lodo e cinzas de carvão foram comparados os tijolos testemunha (tijolos solo -cimento - lote 5).

De uma forma mais explícita, Petrucci (1998) endossa as recomendações da norma, ressaltando que os tijolos maciços de qualidade devem apresentar as seguintes características:

- Regularidade de forma e igualdade de dimensões, garantindo uniformidade no assentamento;
- Arestas vivas e cantos resistentes;
- Homogeneidade da massa, com ausência de fendas, trincas, cavidades e corpos estranhos;
- Cozimento uniforme, o qual produz som metálico quando percutido com martelo;
- Facilidade de corte, apresentando fratura de partículas finas, homogêneas e de cor uniforme.

A Tabela 28 apresenta um resumo das características estéticas apresentadas pelos tijolos incorporados com os resíduos, dos lotes 1 a 4, avaliadas em relação ao respectivo tijolo testemunha (lote 5).

TABELA 28. Características estéticas dos tijolos

Características*	Tijolos (Lote)					
	1	2	3	4	6	7
Coloração	4	2	4	2	1	2
Odor	3	3	3	2	1	2
Regularidade de forma	3	3	3	2	1	1
Arestas vivas e cantos	3	3	3	2	1	1
Homogeneidade da Massa	4	3	4	2	1	2
Facilidade de Corte	2	3	3	2	1	1

\*1= semelhante ao lote 5; 2= pequena alteração; 3=grande alteração; 4=deformação completa

Como pode ser observado, os tijolos dos lotes 3, 4, 6 e 7 foram os que apresentaram acabamento estético mais próximo daquele do tijolo padrão solo-cimento.

### 5.3.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Na Tabela 29 é apresentada a composição química do tijolo constante no lote 06 obtido por FR-X. Os principais constituintes do material foram predominantemente a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), seguida de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio e óxido de ferro. Os outros compostos encontram-se em quantidades menores que 1,5 %. Esses resultados coincidem com o que se espera encontrar na composição química de um tijolo.

TABELA 29. Caracterização Química do Tijolo lote 06

Óxidos	% em massa	Óxidos	% em massa
$\text{Na}_2\text{O}$	0,09		
$\text{MgO}$	1,13	$\text{NiO}$	0,01
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11,4	$\text{ZnO}$	0,01
$\text{SiO}_2$	63,9	$\text{SrO}$	0,02
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,32	$\text{Y}_2\text{O}_3$	<<
$\text{SO}_3$	1,47	$\text{ZrO}_2$	0,1
$\text{Cl}$	0,09	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	0,01
$\text{K}_2\text{O}$	0,51	$\text{BaO}$	0,33
$\text{CaO}$	20	$\text{WO}_3$	0,06
$\text{TiO}_2$	0,1	$\text{PbO}$	0,01
$\text{MnO}$	0,04	PF	2,65
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,24		

### 5.3.4. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

O difratograma do tijolo lote 6 (Figura 27) indica a presença de quartzo, caulinita, calcita e microclínio. As fases cristalinas identificadas bem como os seus padrões de difração e fórmulas químicas estão listados na Tabela 30.

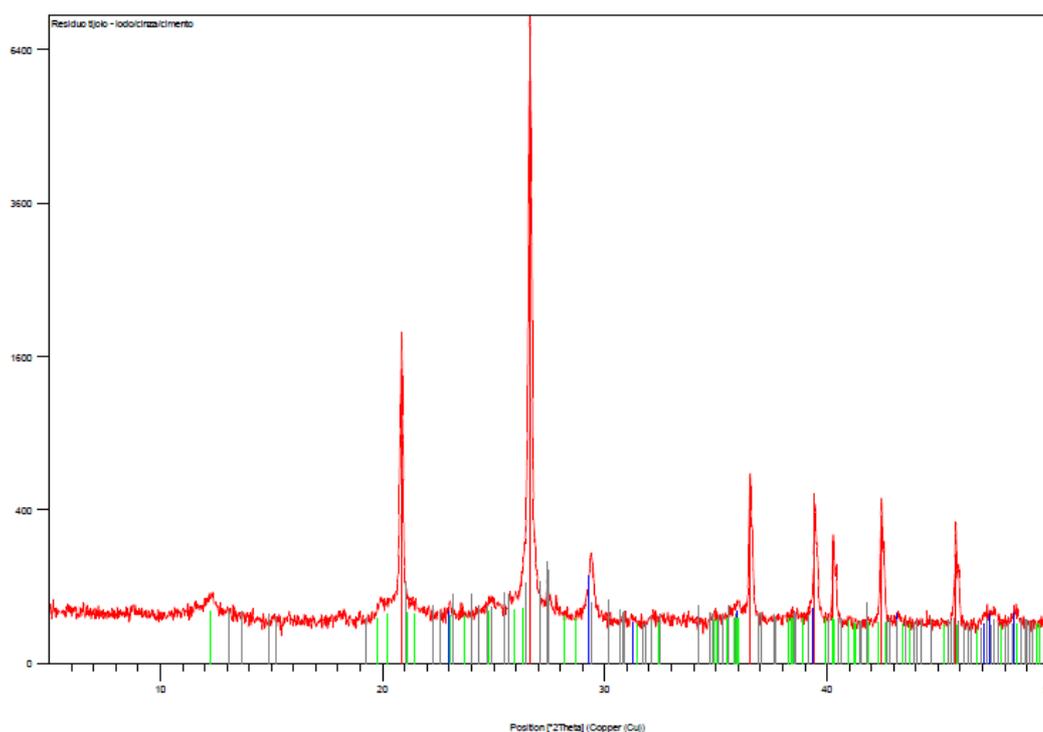


Figura 27. Difratoograma do tijolo lote 6

TABELA 30 – Fases cristalinas identificadas no tijolo lote 6

ICDD	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral
01-083-2465	Quartzo	SiO <sub>2</sub>	Quartzo
01-086-2339	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	Calcita
01-078-1996	Caulinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub>	Caulinita
01-072-1114	Microclínio	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Microclínio

### 5.3.5. Ensaio de caracterização e classificação ambiental

#### 5.3.5.1. Ensaio de lixiviação

Os resultados dos ensaios de lixiviação estão apresentados na Tabela 31. Comparando os valores obtidos com os apresentados nos anexos normativos F da NBR 10.004/2004, pode-se observar que todos estão abaixo do limite exigido pela referida norma. Dessa forma, é possível classificar o material como **CLASSE II - NÃO PERIGOSO**.

TABELA 31- Resultados das análises de Lixiviação (Comparados com Anexo F da NBR 10004)

Parâmetros	Unidades	Resultados obtidos	Limites (MVR)
Arsênio	mg/L de As	0,01	5,0
Cadmio	mg/L de Cd	0,02	0,5
Chumbo	mg/L de Pb	0,08	5,0
Cromo total	mg/L de Cr	0,04	5,0
Prata	mg/L de Ag	0,005	5,0
Selênio	mg/L de Se	0,2	1,0
Bário	mg/L de Ba	0,371	70,0

### 5.3.5. 2. Ensaio de solubilização

Os resultados do ensaio de solubilização estão apresentados na Tabela 32. Comparando os valores obtidos com os apresentados nos anexos normativos G da NBR 10.004/2004, pode-se observar que os elementos assinalados em negrito estão acima do limite exigido pela referida norma. Dessa forma, o material é classificado como Classe **IIA – NÃO INERTE**.

TABELA 32 - Resultados das análises de solubilização (Comparados com Anexo G da NBR 10004)

Parâmetros	Unidades	Resultados obtidos	Limites (MVR)
Arsênio	mg/L de As	0,01	0,01
<b>Chumbo</b>	<b>mg/L de Pb</b>	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>
Cromo total	mg/L de Cr	0,04	0,05
<b>Alumínio</b>	<b>mg/L de Al</b>	<b>2,18</b>	<b>0,20</b>
Bário	mg/L de Ba	0,0001	1,00
Cadmio	mg/L de Cd	0,02	0,05
Cobre	mg/L de Ag	0,003	0,05
Ferro total	mg/L de Fe	0,006	0,30
<b>Selênio</b>	<b>mg/L de Se</b>	<b>0,2</b>	<b>0,01</b>
Sódio	mg/L de Na	5,12	200,00
Zinco	mg/L de Zn	0,007	5,00
Prata	mg/L de Ag	0,005	0,050
Manganês	mg/L de Mn	0,1	0,100

Segundo Silva (2009), a inertização do tijolo lote 6 se deve ao poder de estabilização do cimento. Sendo assim, de acordo com esta classificação, os tijolos que atendem as especificações da NBR 10836/94, podem ser empregados para fins construtivos sem nenhum impacto negativo ao meio ambiente.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram confeccionados tijolos ecológicos com incorporação de cinzas leve de carvão retidas no filtro ciclone e de lodo de estação de tratamento de água com diferentes proporções mássicas. Todos os materiais utilizados e os produtos foram caracterizados e as principais conclusões obtidas a partir dos resultados obtidos foram as seguintes:

1. A análise química das cinzas de carvão mostrou a predominância dos compostos sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em sua composição. As cinzas apresentaram propriedades pozolânicas.
2. Na caracterização mineralógica das cinzas de carvão encontraram-se as fases cristalinas de quartzo, mulita e hematita.
3. Na análise das cinzas de carvão usando-se um microscópio eletrônico de varredura pode-se constatar a morfologia típica encontrada em cinzas constituída de partículas heterogêneas com formatos irregulares e esferas de superfície lisa sólidas e ocas.
4. O tamanho das partículas de cinzas de carvão estava entre 0,399 a 200  $\mu\text{m}$  com diâmetro médio de 15,5  $\mu\text{m}$ .
5. A composição química majoritária do lodo de ETA foi de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que correspondeu à cerca de 95,1% em massa. O maior percentual químico da composição foi o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , podendo esse composto ser proveniente da fração terrosa dos sólidos dissolvidos água do rio,

bem como, ser oriundo dos precipitados químicos, no caso, o coagulante Policlorato de Alumínio (PAC) adicionado na fase de coagulação da água.

6. As partículas do lodo de ETA constituíam-se por aglomeração de grãos de formas irregulares com morfologia não definida, evidenciando frágil desagregação quando seco e com baixa interação química entre si.
7. A caracterização mineralógica do lodo de ETA mostrou a presença das fases quartzo, caulinita, goethita e emuscovita. Esses grupos foram identificados também na análise por infravermelho.
8. O lodo de ETA apresentou a seguinte distribuição granulométrica: areia (58,23%) formada por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm, silte (6,83%) formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm e a argila (35,16%) constituída por partículas com dimensões menores que 0,002 mm.
9. Os tijolos confeccionados apenas com lodo (90%) e cinza (10%) não possibilitaram o ensaio em prensa para verificar o limite estabelecido na NBR10836/94.
10. Os tijolos com as proporções mássicas cinza:lodo:solo:cimento de 5:45:45:5 e de 10:20:60:10, nos ensaios de resistência à compressão, ficaram abaixo do estabelecido na NBR 10836/94, não podendo ser recomendados para uso na construção.
11. Os tijolos com as proporções mássicas cinza:lodo:solo:cal de 13:20:60:7 e 7:20:65:13 não atenderam aos requisitos mínimos quanto à compressão e à absorção de água constantes na NBR10836/94.

12. Os tijolos com as proporções mássicas cinza: lodo: solo: cimento de 8:20:60:12 atenderam aos requisitos mínimos quanto à compressão e à absorção de água constantes na NBR10836/94, podendo ser recomendado para o uso na construção. Esses tijolos foram classificados com classe II- não inerte.

Pode-se concluir que a adição dos resíduos de cinzas leve de carvão e lodo de estação de tratamento de água na confecção de tijolos ecológicos do tipo prensado poderá configurar-se numa prática ecologicamente correta. Esse procedimento dispensa o processo de cozimento, reduz o volume de material descartado na natureza, reduz a exploração dos recursos naturais e o consumo de cimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOY, N. ***Secagem Natural e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água (LETAs)***. 1999. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

ADRIANO, D.C. , PAGE, A.L., ELSEEWI, A.A., CHANG, A.C. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review. **Journal of Environmental Quality**.V.9, p.333-344, 1980.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL - <<http://www.aneel.gov.br>>.

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. Progress in Energy and Combustion Science, **Energy & Fuels** V.36, p.327-363, 2010.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), 1991 <<http://www.awwa.org/index.cfm>>.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE) E ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residuals**. April. Denver. 294 p. 1996.

ANDRADE, A. C. F. ***Tijolos de Cinza volante e cal- Estudo do Desempenho quanto a resistência, absorção, durabilidade e aderência***. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Porto Alegre, 1991.

ANDREOLI, C. V. ***Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e disposição Final***. 1ª. ed. Rio de Janeiro: ABES, 257 p. 2001.

ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F. ; SALES, A. ; BARON, O. .

**Caracterização físico-química do lodo da Estação de Tratamento de Água Passauna.** In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE BIODISSÓLIDOS, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento:** normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: **Rochas e Solos.** Rio de Janeiro. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **solo-Analise Granulométrica** – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004 - **Resíduos sólidos:** classificação. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Lixiviação.** NBR 10005. Rio de Janeiro. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 10006 - **Resíduos Sólidos – Solubilização.** Rio de Janeiro. 2004..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 10007 – **Amostragem de Resíduos.** Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10832: **fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com utilização de prensa manual.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10834: **Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10836: – **Bloco vazado de solo- cimento. Determinação da resistência à compressão e a absorção de água.** Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10836 – **Bloco vazado de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e a absorção de água. Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653/92. **Materiais pozolânico** – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C . NBR 13600. Rio de Janeiro. 1996.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. **Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes.** Tese (Doutorado). Minho-Portugal, 2002. Universidade do Minho.

BARBOSA, R. M. **Avaliação do impacto de lodos de estações de tratamento de água à biota aquática através de estudos ecotoxicológicos.** 2000. Tese (Doutorado) São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BARONIO, G. E; BINDA, L. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. **Construction and Building Materials**, V. 11, p. 41-46, 1997

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodo de Estações de Tratamento de Agua. Rio de Janeiro: RiMa/ABES/PROSAB; p.119-141, 2001.

BRINK, N. C. P.; GARDENALLI, J. F.; FERREIRA FILHO, S. **Desaguamento mecânico de lodos de estação de tratamento de esgotos em conjunto com lodos de estação de tratamento de água.** In: 23<sup>º</sup> CONGRESSO

RASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais ABES:** Campo Grande, MS. 2005.

BRUNO, M.; ***Utilização de Zeolitas Sintetizadas a partir de Cinzas de Carvão na Remoção de Corante em Água.*** 2008. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil.

BOTERO, W. G. ***Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola.*** 2008. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química de Araraquara. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara.

CALARGE, L. M., Desenvolvimento de tijolos maciços a partir de cinzas pesadas e cal hidratada: caracterização da cinza pesada, **Gerenciamento de Resíduos e Certificação ambiental**, 130-109, 2000.

CALARGE, L.M., SILVA, N.I.W., CHIES, F., ZWONOK, O. Desenvolvimento de tijolos maciços a partir de cinzas pesadas e cal hidratada. I- Caracterização da cinza pesada. In: FRANKENBERG, C.L.C., RAYA-RODRIGUES, M.T., CANTELLI, M. (Eds). ***Gerenciamento de resíduos e certificação ambiental.*** Porto Alegre, V. 1, p. 130 - 139, 2000.

CARVALHO, T. E. M.; FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C. Adsorção do corante reativo laranja 16 de soluções aquosas por zeólita sintética ***Química. Nova***, V. 33, p. 358-363, 2010.

CARVALHO, T. E. M. ***Adsorção de corantes em água usando zeólita sintética.*** 2010. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil.

CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (CEPED). ***Avaliação de edificações com paredes monolíticas, tijolos e blocos de solo-cimento (relatório final).*** Camaçari. 1989.

CENTRO INTERAMERICANO DE VIVIENDA Y PLANEJAMENTO (CINVA). .  
*Guia de auto-construcción*. Bogotá. CINVA. 1961.

CHAO, I.R.S. **Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água**. 2006. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. – **Caracterização dos resíduos industriais do estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil**. In: I Encontro nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis. **Anais**, V. único, p. 81-86, Canela – RS. 1997.

CHERIAF, M., PÉRA, J., ROCHA, J. C. Pozzolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash. **Cement and Concrete Research**. V. 29 p. 1387–1391, 1999.

CHIES, F., SILVA, N.I.W., ZWONOK, O. Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão - CIPECAL. In: ROCHA, J.C., JONH, U.M.(Eds). **Utilização de resíduos na construção habitacional**. (Coleção HABITARE, v.4). Porto Alegre, p. 218 - 239, 2003.

CORDEIRO, J. S. **Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de Estações de Tratamento de Água (LETAs)**. 1981. Dissertação (Mestrado em Hidráulica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água**. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1993.

CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de Estações de Tratamento de Água.** In: Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodo de Estações de Tratamento de Água. Cap. 1. p.1-19. Rio de Janeiro: RiMa/ABES/PROSAB. 1999.

CORDEIRO, J. S. **Gerenciamento de Lodo de ETAs – Remoção de água, através de leitos de secagem e codisposição da fase sólida em matrizes de cimento e resíduos da construção civil.** São Carlos: UFSCar / FINEP: 145 p. Relatório Técnico PROSAB 2. 2000.

CORDEIRO, J. S. **Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs).** In: Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. PROSAB/ REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro, 2001.

CORNWELL, D. A. Water Treatment Plant Residuals Management. **In: Water Quality and Treatment. McGraw-Hill.** Cap. 16. 5ª. ed. McGraw-Hill. Washington. D. C. 1267 p., 1999

DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute. *Water Environment Research*, vol. 73, 01 p. 52-57, 2001

DEPOI, F.S.; POZEBON, D.; KALKREUTH, W.D. Chemical characterization of feed coals and combustion-by-products from Brazilian power plants. ***International Journal of Coal Geology*** V. 76, p. 227-236, 2008.

DI BERNARDO, L.; CARVALHO, E. H. de; SCALIZE, P. S. **Disposição de Resíduos Líquidos de Estações de Tratamento de Água (ETAs) em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).** In: REAL, M. A. P. Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de ETA. Cap. 8. p.169-202. ABES/PROSAB. Rio de Janeiro. 1999.

DIAS, L. M.; BATALIONE, G; MORAIS, F. U.; SOBRINHO, J. F.; RIBEIRO, M. C.; LISBOA, M. S. **Alternativa de Destinação Final do Lodo de Estação de Tratamento de Água – Fabricação de Blocos Cerâmicos** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, XXVIII, Cancun-México. **Anais**, CD ROM. 2002

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2ª ed. 1997. 212p.

ESCOLA SENAI MARIO AMATO. **Relatório final do projeto de reciclagem de lodos das estações de tratamento de água da REGIÃO METROPOLITANA DO ESTADO DE SÃO PAULO (RMSP): incorporação em produtos cerâmicos da construção civil.** São Paulo: SENAI, 2006.

FARIA, J. R. G.. **Unidade de produção de tijolos de solo estabilizado** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1990.

FAY, L.. **Aproveitamento de Resíduos siderúrgicos para a Fabricação de Elementos Construtivos para Alvenarias na Construção Civil.** 2006. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ.

FELT, E. J. *Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures.* Portland Cement Association, p.138-162, 1990.

FERRANTI, E. M.; GEHLING, G. R. **Alternativa para desidratação de lodos de estação de tratamento de água (ETA) em leitos de secagem – condicionamento químico com resíduo de cal.** In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais ABES:** Campo Grande, MS. 2005.

FERRAZ, A. L. N.; SEGANTINI, A. A. S. **Estudo da Aplicação de Resíduos de Argamassas de Cimento nas Propriedades de Tijolos de Solos Cimento**. IBRACON – V. V - Pré-Fabricados em Concreto - Trabalho CBC0238

FERRAZ, A. L. N. **Análise da adição de resíduos de argamassa de cimento em tijolos prensados de solo-cimento**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.

FERRAZ JUNIOR, F. de A. C. (1995). *Equipamentos modernos para a produção de tijolos de terra prensada*. In: WORKSHOP ARQUITETURA DE TERRA. São Paulo. **Anais**. NUTAU-FAUUSP. p.163-179.

FERRAZ, R. L.; BELICANTA, A.; GUTIERREZ, N. H. M. (2001). *Estudo comparativo de alguns métodos de dosagem de misturas de solo-cimento*. In: ENTECA 2000. **Anais**. Maringá. PR.

FERREIRA, B.S.; REGO,V.B.; CALIARI, P.C. Caracterização de Lodo para Incorporação em Concreto e Fabricação de Tijolos. 2º ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA QUÍMICA. In: ENTEQUI 2009. **Anais**. Salvador BA.

FERRET, L.S. **Zeólitas de cinzas de carvão: síntese e uso**. 2004. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FISHER GL, CHANG DPY, BRUMMER M. Fly ash collected from electrostatic precipitators: microcrystalline structures and the mystery of the spheres. **Science**; 192:553–5, 1976.

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V.; PAULI, D. R.; BARROS, M. A. L; CARVALHO, M. H. de; MENETTI, N. C. **Estudo da estabilização de lodo oriundo da Estação de Tratamento de Água de Taiapuê para Utilização com material em reaterro de valas**. In: CONINFRA – CONGRESSO DE

INFRA- ESTRUTURA DE TRANSPORTES. São Paulo, 25 a 28 de junho de 2008.

FUNGARO, D. A.; SILVA, M. G.; Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão como adsorvedor de metais em água. **Química Nova**, V.25, p. 1081 – 1085, 2002.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C. Tratamento de efluentes industriais usando material zeolítico preparado com cinzas de carvão. In: Água – Fonte da Vida/ Prêmio Jovem Cientista e Prêmio Jovem Cientista do Futuro. Porto Alegre, RS: Gráfica e Editora Comunicação Impressa. p. 129 – 143, 2004.

FUNGARO, D. A.; Aplicação de material zeolítico preparado com cinzas de carvão no tratamento de águas contaminadas. **Revista Meio Filtrante**, Abril/Maio/Junho de 2004. <<http://www.meiofiltrante.com.br>>.

FUNGARO, D. A.; FLUES, M. S-M; CELEBRONI, A. P.; Estabilização de solo contaminado com zinco usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão. **Química Nova**, V.27, p. 582 – 585, 2004.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C.; ALMEIDA, R. S.; Remoção de compostos tóxicos de solução aquosa por adsorção com zeólita sintetizada a partir de cinzas de carvão **Eclética Química**, V.30, p. 31- 35, 2005.

FUNGARO, D. A.; Tratamento de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão. **Revista Meio Filtrante**, Janeiro/Fevereiro de 2006. <<http://www.meiofiltrante.com.br>>.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C.; Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão. **Química Nova**, V.29, p. 735 -740, 2006a.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C.; Estudo da remoção de íons metálicos em água utilizando zeólitas sintetizadas com cinzas de carvão. **Tché Química**, V.3, p. 21-30, 2006b : <<http://www.tchequimica.com>>

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C.; Modelagem cinética da remoção de  $Cd^{2+}$  por zeólitas de cinzas de carvão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, V.25, p. 9-13, 2008.

FUNGARO, D. A.; BRUNO, M. Utilização de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão para remoção de azul de metileno em água. **Orbital**, V. 1, p.49-63, 2009a.

FUNGARO, D. A.; BRUNO, M. Remoção de azul de metileno de solução aquosa usando zeólitas sintetizadas com amostras de cinzas de carvão diferentes **Química Nova**, V. 32, p. 955-959. 2009b.

FUNGARO, D. A.; BRUNO, M.; GROSCHE, L .C.; Adsorption and kinetic studies of methylene blue on zeolite synthesized from fly ash. **Desalination and Water Treatment**, V.2, p. 231-239. 2009a

FUNGARO, D. A.; REVA, J.; IZIDORO, J. C.; Remoção de vermelho do congo de solução aquosa por zeólitas de cinzas de carvão: estudo cinético e análise de isotermas de equilíbrio. **Tché Química**, V.6, p. 25-32. 2009b <<http://www.periodico.tchequimica.com>>

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C; BRUNO, M. Aplicação de material zeolítico sintetizado de cinzas de carvão como adsorvente de poluentes em água. **Eclética Química**, V.34, p. 45-50, 2009c.

FUNGARO, D. A.; GRACIANO, J. E. A.; Adsorption of Zinc Ions from Water Using Zeolite/Iron Oxide Composites. **Adsorption Science and Technology** , 10, p. 729 -740, 2007.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JUNIOR, A. D. Disidratação de lodos produzidos em Estações de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17, v. 2. p. 324-341. **Anais**, Natal. 1993.

GAVA G. P. **Estudo Comparativo de Diferentes Metodologias para Avaliação da Atividade Pozolânica**. 1999. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

GUERRA, R. C. **Caracterização e biodegradação de lodo de estação de tratamento de água para descarte em aterro sanitário**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

GRANDE, F. M. **Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual com e sem Adição de Sílica Ativa**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

GROSS, M.; SOULARD, M.; CAULLET, P.; PATARIN, J.; SAUDE, I. Synthesis of fauja site from coal fly ashes under smooth temperature and pressure conditions: **A cost saving process. Microporous and Mesoporous Materials**, v. 104, p. 67-76, 2007

HALL, W. S. & HALL, L. W. **Toxicity of alum sludge to Ceriodaphnia dubia and Pimephales promelas**. Bull Environ. Building Environmental Contamination and Toxicology. 1989.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). (1977a). **Casa evolutiva em mutirão concentrado em blocos de solo-cimento: fase 1- aplicação do solo-cimento à habitação**. São Paulo. Relatório 9795. IPT.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). (1977b). ***Casa evolutiva em mutirão concentrado com tijolos de solo-cimento: fase 1- aplicação do solo-cimento à habitação.*** São Paulo. Relatório 10.641. IPT.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). (1978). ***Implementação técnica de tijolos de solo-cimento através da máquina automática TOR-HPT-30.*** São Paulo. Relatório 11.273. IPT.

INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION – CIB.(1999). ***agenda 21 on sustainable construction.*** Rotterdam. CIB Report Publication 237. CIB

IZIDORO, J. C.; FUNGARO, D. A.; Utilização de resíduos de usinas termelétricas a carvão na síntese de zeólitas e sua aplicação na remoção de  $Zn^{2+}$  e  $Cd^{2+}$  em água. ***Revista. Brasileira Pesquisa e Desenvolvimento.*** 2007, 9, p. 101-106.

IZIDORO, J. C.; ***Estudo Sobre a Remoção de Íons Metálicos em Água Usando Zeólitas Sintetizadas a partir de Cinzas de Carvão.*** 2008. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil.

HAMLEY, P., LESTER, E., THOMPSON, A., CLOKE, M., POLIAKOFF, M. The removal of carbon from fly ash using supercritical water oxidation. In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, 4., 2001, Lexington, Kentucky, USA. ***Proceedings...*** Lexington: University of Kentucky, p. 192 - 199, 2001.

HEMMINGS, R. T., BERRY, E. E. Speciation in size and density fractionated Fly Ash. Fly Ash and Concession by Products: Characterization, Utilization and Disposal. Materials Research Society Symposia ***Proceedings.*** 113, p. 3-38, 1985.

HOPPEN, C.; PORTELA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V.A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica** nº 51. p. 85-95. 2005.

HOPPEN, C.; PORTELA, K. F. .; ANDREOLI, C. V; SALES, A.; JOUKOSKI, A. Estudo de Dosagem para Incorporação do Lodo em Matriz de Concreto, como forma de Disposição Final. In: 23º. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais** : ABES. Pará. 2005.

HOPPEN, C., PORTELLA, K.F., JOUKOSKI, A., BARON, O., FRANCK, R., SALES, A., ANDREOLI, C.V., PAULON, V.A., Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Química Nova**, Vol. 29, p., 79-84, 2006

KARATEPE, N., et al. Preparation of active SO<sub>2</sub> sorbents from fly ash. In: International Congress on Coal Science, 1997. **Proceedings...**, Alemanha: A. Ziegler et al (Eds.), 1997. p.1723-1726.

KREUZ A. L.; ***Utilização de Cinzas Pesadas de Termoelétricas na Substituição de Cimento e Areia na Confecção de Concreto.*** 2002. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil 2002.

LAKSHMANAN V.I., Melnbardis D, Geisler RW ; **Process for treatment of fly ash.** US 4,798,709, 8 jun. 1987, 17 Jan. 1989.

LANGE, L. C. *Notas de aula da disciplina Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais.* (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

LEVANDOWSKI, J.; KALKREUTH, W. Chemical and petrographical characterization of feed coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant, Paraná, Brasil. *International Journal of Coal Geology*. 77, p. 269-281, 2009.

LOPES, L. N. A; MACHADO, L. C. G. T; LIMA, R. F; PEREIRA, J. A. R. (2005). Avaliação do desaguamento de lodo de ETA em leito de secagem. In: 23º. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais** : ABES. Pará. 2005.

MAGDALENA, C. P. **Adsorção de corante reativo Remazol Vermelho RB de solução aquosa usando zeólita de cinzas de carvão e avaliação da toxicidade aguda com *Daphnia similis***. 2010. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil.

MALHOTRA V. M., MEHTA P. K. *Pozzolanic and Cementitious Materials*. Advances in Concrete Technology. Vol 1. Ottawa. Canada. 1996. 191 p.

MARTINS, J. L. **Aproveitamento de Cinza de Carvão Mineral na Agricultura**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2001.

MARTINS, M. A. P. M. **Desenvolvimento de um compósito de material polimérico PE com a cinza resultante da queima de carvão mineiral**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2008.

MEGDA, R. M.; SOARES, L. V.; ACHON; C. L. Propostas de Aproveitamento de Lodos Gerados em ETAs. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais** ABES: Campo Grande, MS. 2005.

MEHTA, P.K. **Natural Pozzolan**. In: Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p

MEHTA P. K., MONTEIRO P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. PINI, 1ª edição, São Paulo, 1994.

MELLO, J.C.P.; PETROVICK, P.R. Quality control of *Bacharis trimera* (Less) DC (Asteraceae) hydroalcoholic extracts. **Acta Farm. Bonaerense**, v.19, p.211-215, 2000.

MENESES, A. C. L. S. M.; GADELHA, C. L. M.; MACHADO, T. T. V.; ALMEIDA, T. M. V.; JUNIOR, W. R. S. **Avaliação preliminar dos possíveis impactos dos lançamentos dos resíduos gerados de ETA de pedras de fogo na qualidade da água do riacho avenca/PB**. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais ABES**: Campo Grande, MS. 2005.

MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES POZOLÂNICAS DE ARENITOS OPALINOS DA SERRA DE ITAQUERI, SP. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, 23(1), 13-24, 2002.

MONTEIRO, S. N. ALEXANDRE. J. MARGEM J. L, R.; SANCHES. R.; VIENIRA, C. M. F. **Incorporation of sludge waste from water treatment**. Construction and Building Materials, January. 2007.

MOREIRA, A. S. **Avaliação da Utilização de Resíduo Gerado em Sistemas Úmidos de Filtragem de Particulados de Fundição como Matéria Prima na Construção Civil**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais- Belo Horizonte, 2006.

MORUZZI, R.B. **Incorporação do lodo gerado na Estação de tratamento de água (ETAII) do município de Rio Claro-SP em argila utilizada para a**

**produção de cerâmica vermelha.** 4º ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS. Ponta Grossa Paraná 2008.

MOUHARIS, T.H.; CHARISTOS, D. ;KANTIRANIS, N.; FILIPPIDIS, A.; KASSOLI-FOURNARAKI, A.; TSIRAMBIDIS, A. GIS-type zeolite synthesis from Greek lignite sulphocalcic fly ashes promoted by NaOH solutions. *Microp. Mes. Mat.* , v 61, p. 57, 2003.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica* **50**; p. 322-330, 2004

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.* v.10, n.2, p.490–496, 2006. Disponível em <http://www.agriambi.com.br/revista/v10n2/490.pdf>. Acessado em Maio/2011.

OZDEMIR, O.; ERSOY, B.; CELIK, M.S. Separation of pozzolonic materials from lignitic fly ash of Tuncbilek Power Station. In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, 4., 2001, Lexington, Kentucky, USA. *Proceedings...*Lexington: University of Kentucky, 2001. p.288-295.

PAIXÃO, L. C. C. **Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

PAPROCKI, A. **Síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão visando sua utilização na descontaminação de drenagem ácida de mina.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica, Rio Grande do Sul.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland**, Editora Globo, Rio de

Janeiro, 1993.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de Construção**, Editora Globo, Rio de Janeiro, 1998.

PIRES, M.; QUEROL, X. Characterization of Candiota (South Brazil) coal and combustion by-product. **International Journal of Coal Geology**, v. 60, p. 57-72, 2004.

PORRAS, A.C.; ISAAC, R. L.; MORITA, D. M. **Viabilidade técnica da incorporação do lodo dos decantadores das estações de tratamento de água 3 e 4 de Campinas em tijolos estabilizados com cimento**. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais** ABES: Campo Grande, MS. 2005.

PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. **Caraterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna**. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL. **Anais** ABES: Joinvile, SC.2003.

POZZOBON C. E. **Aplicações Tecnológicas para a Cinza do Carvão Mineral Produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**. 1999. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

PRACIDELLI, S; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 2, p. 31-35, 1997 .

QUEROL X., MORENO N., UMAÑA J. C., ALASTUEY A., HERNANDEZ E., LÓPEZ-SOLER A., PLANA F.; Synthesis of zeolites from coal fly ash: in overview. **International Journal of Coal Geology**, v.50, p.413-423, 2002.

QUINTANS, A. L.L. Estudo das Propriedades mineralógicas, Físicas e **Mecânicas de um Solo arenoso Fino Laterítico (SAFL) Utilizado na Pavimentação do Complexo Aeroportuário da Grande Natal – RN/NE**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande Campina Grande PB. 2008.

RANGANATH R. V., BHATTACHARJEE B., KRISHNAMOORTHY S. Influence of Size Fraction of Poned Ash on Its Pozzolan Activity. **Cement and Concrete Research**, V. 28, N. 5, p. 746–761, 1998.

RAYZMAN V. L.; SHCHERBAN S. A. ; DWORKIN R. S. Technology for chemical-metallurgical coal ash utilization. **Energy and Fuels**, v.11, p.761-773, 1997.

REED, J. S., **Principles of Ceramic Processing**, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York (1995).

REIS, J. P. **Incorporação de resíduos industriais em massa cerâmica usada na fabricação de tijolos**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Estado de Santa Catarina. UDESC , Santa Catarina. Brasil.

RESOLUÇÃO Nº 307, DE 5 DE JULHO DE 2002, CONSELHO NACIONAL DO  
MEIO AMBIENTE (CONAMA) -  
<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em:  
06 dez 2011

RESOLUÇÃO N° 313, DE 29 DE OUTUBRO DE 2002, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA) -

<<http://www.areaseg.com/conama/2002/313-2002.pdf>>. Acesso em: 06 dez 2011

REYNOLDS, R. et al. The manufacture and evaluation of na artificial soil (SLASH) prepared from fly ash and sewagew sludge. In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, 3., 1999, Lexington, Kentucky, USA. **Proceedings...** Lexington : University of Kentucky, 1999. p.378-385.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de Estações de Tratamento de Água**. 1ª. ed. ,Edgard Blücher. São Paulo:. 2001.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETO, J. M. de. **Tratamento de Água**. 5ª reimpressão, Edgard Blücher. São Paulo, 2003.

RODRIGUES, J. K. G. **Pressiômetros, Tensões e Deformações em Sub-bases de Pavimentos Flexíveis**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 1998.

ROHDE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil. Aspectos técnicos e Ambientais**. V.I, CIENTEC, Porto Alegre. 2006.

SABBAG, M. G. **Incorporação de lodo de estação de tratamento de água em blocos cerâmicos**. 2003. Iniciação Científica. (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo.

SABESP. Relatório Ambiental Preliminar (RAP) do aterro exclusivo para disposição de lodo da ETA Taiaçupeba. São Paulo. (Estudo Técnico SABESP). 2002.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologias de argilas**. Ed. PINI, 2ª edição, Vol. 1, S. Paulo (1997).

SANTOS, I. S. S.; RAMIRES, M. V. V.; KAZMERCZACK, C.S.; SILVA, H. C.; KERN, A. P.; CAMARGO, S.A. Caracterização e Identificação do Resíduo:

Lodo da Estação de tratamento do Município de São Leopoldo. XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais:** ABES. 2005.

SARON, A; LEITE, V. M. B. Quantificação de lodo em ETA. In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. João Pessoa. **Anais:** ABES. 2001.

SCALIZE, P. S. ***Caracterização e Clarificação por Sedimentação da Água de Lavagem de Filtros Rápidos de Estações de Tratamento de Água que utilizam Sulfato de Alumínio como Coagulante Primário.*** 1997. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

SILVA, N. I. W. J. R.; CHIES F., ZWONOK O. Uso de Cinzas de Carvão na Construção Civil. I ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, **Anais. Canela** - RS, p. 15-20, 1997..

SILVA, N. I. W., CALARGE L. M., CHIES, F., MALMAMM, J. E. ZWONOK, O. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**, V.45, p.184-187, 1999.

SILVA, M. R.; ***Incorporação de Lodo e Estação de tratamento de Água (ETAs) em Tijolo de Solo-Cimento como Forma de Minimização de Impactos Ambientais.*** 2009. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Aracruz E. S.

SILVA, M. V.; FUNGARO, D.A. Caracterização de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Cinzas de Carvão Visando sua Utilização na Manufatura de Tijolo. 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION. São Paulo 2011.

SILVA JUNIOR, A. P. da.; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L. da M. **Avaliação da Lixiviação de Alumínio e da Produção de Ácidos Graxos Voláteis em Reatores Anaeróbios Utilizados para Estudar a Disposição**

**Final de Lodos de ETAs em Aterros Sanitários.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, XXVII, Porto Alegre: **Anais**, CD ROM. 2000.

SILVA JUNIOR, A. P.; ISAAC, R. L. Adensamento por gravidade de Lodo de ETA gerado em decantador Convencional e decantador laminar. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, XXVIII, Cancun-México. **Anais**, CD ROM. 2002

SJOSTROM, E. Service life of the building. In: APPLICATION OF THE PERFORMANCE CONCEPT IN BUILDING. CIB: Tel-Aviv:1996, v.2, p.6-1;6-11.

SOUZA, M. I. B. **Análise da Adição de Resíduos de Concreto em Tijolos Prensados de Solo-Cimento.** Dissertação (Mestrado). Ilha Solteira Universidade Estadual Paulista. 2006.

TAYLOR P. C., KRUGER R. A. Effects of Fly Ash Particle Size on Concrete Proprieties. INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM. **Anais** .Lexinton. Kentucky, 1997. p. 350-360.

TISHMACK, J. K.; PETERSON, J. R.; FLANAGAM D. C. Use of coal combustion by-products to reduce soil erosion. In: INTERNATIONAL ASH UTILIZATION SYMPOSIUM, 4., 2001, Lexington, Kentucky, USA. **Proceedings...** Lexington: University of Kentucky, 2001. p.428-438.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, N. R. ALÉSSIO, G.T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural, **Cerâmica** 52, 215-220, 2006.

TOCCHETTO, M.R.L. **Resíduos sólidos industriais: Gerenciamento e destinação final.** Dissertação (Mestrado). Santa Catarina. Universidade Federal de Santa Catarina. 2000.

TSUCHIAI H., O ISHIZUKA T., UENO T., HATTORI H., KITA.; High active absorbent for SO<sub>2</sub> removal prepared from coal ash. ***Industrial and Engineering Chemistry Research***, v.34, p.1404-1411, 1995.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL **Anais: ABES**. Paraíba. João Pessoa. 2001.

UMAÑA-PEÑA, J. C. ***Síntesis de zeólitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón***. 2002. Tese (Doutorado) - Universität Politécnica de Catalunya, Barcelona, Espanha..

VAN VLACK, L. H.; ***Propriedades dos materiais cerâmicos***. São Paulo. EDUSP/Edgard Blucher. 1973

VASSILEV, S. V.; MENENDEZ, R.; ALVAREZ, D.; DIAZ-SOMOANO, M.; MARTINEZ- TARAZONA, M. R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as abas is for their multicomponent utilization. 1. Characterization of feed coals and fly ashes. ***Fuel***, V. 82, p. 1793-1811, 2003

VILCHES, L. F., et al. Development of new fire-proof products made from coal fly ash: the CEFYR project. ***Journal of Chemical Technology and Biotechnology***, v.77, p.361-366, 2002.

VIOLANI, M. A. F.; ***Estabilização do latossolo roxo para a produção de tijolos – a experiência de Londrina***. 1987. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos.

WANG, K.S.; CHIOU, I.J.; CHEN, C.H.; WANG, D.; ***Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash***. *Construction and Building Materials*, v. 19, pp. 627-633, 2005.

WANG, K.S., WU, H. Environmental-benign utilization of fly ash as low-cost adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*, V. B136, p. 482-501, 2006.

WOLFF, E; SCHWABE, W. K.; LANDIM, A. B.; VITORINO, M. D.; SANTOS, W. L. **A Caracterização do Lodo da ETA Cenibra para Emprego na Cerâmica Vermelha.** In: 23<sup>º</sup>. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais:** ABES. Pará. 2005.