

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**DIOGO PEDREIRA LIMA**

**CARACTERIZAÇÃO DE LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE  
ÁGUA UTILIZADO COMO AGREGADO NA CONSTRUÇÃO CIVIL  
EM ELEMENTOS DE TELHAS VERMELHAS**

**PALMAS-TO  
2016**

DIOGO PEDREIRA LIMA

**CARACTERIZAÇÃO DE LODO DA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA UTILIZADO COMO AGREGADO NA  
CONSTRUÇÃO CIVIL EM ELEMENTOS DE TELHAS  
VERMELHAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Fundação Universidade Federal do Tocantins como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Aurélio Pessoa Picanço

Co-Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Rose Mary Gondim Mendonça

PALMAS-TO  
2016

## FOLHA DE APROVAÇÃO

DIOGO PEDREIRA LIMA

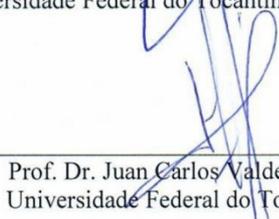
CARACTERIZAÇÃO DE LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA  
UTILIZADO COMO AGREGADO NA CONSTRUÇÃO CIVIL EM ELEMENTOS  
DE TELHAS VERMELHAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental,  
Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca  
Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

## BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Aurélio Pessoa Picanço  
Universidade Federal do Tocantins (Presidente)



Prof. Dr. Juan Carlos Valdés Serra  
Universidade Federal do Tocantins



Prof. Dr. João Evangelista Marques Soares  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

Aprovada em: 30 de maio de 2016  
Local de defesa: Sala 27 do bloco II  
Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

L732c Lima, Diogo Pedreira.

Caracterização de lodo da estação de tratamento de água utilizado como agregado na construção civil em elementos de telhas vermelhas. / Diogo Pedreira Lima. – Palmas, TO, 2016.

80 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2016.

Orientador: Aurélio Pessoa Picanço

Coorientadora : Rose Mary Gondim Mendonça

1. Lodo de ETA. 2. Agregado descartado. 3. Telhas cerâmicas. 4. Aproveitamento de resíduos. I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizada desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

## DEDICATÓRIA

À Deus, aos meus pais, irmãos, minha esposa, minha filha e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

À Santíssima Trindade (Pai, Filho e Espírito Santo). À Nossa Senhora pela intercessão em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais Júlio Santos Lima (In Memoriam) e Irene Pedreira Lima, pelo amor, dedicação e eternos exemplos os quais levarei por toda a minha vida.

À minha amada esposa Poliana Ribeiro Pereira Pedreira com todo amor e carinho por toda a sua, ajuda, paciência, compreensão, dedicação e amor. Somente eu e você sabemos a sua respectiva parcela de contribuição para que esse objetivo fosse alcançado.

À minha filha Máisa Ribeiro Pedreira, por existir e com um sorriso, um abraço ou um carinho ou apenas observar você dormindo me fez acreditar que valia a pena continuar.

Aos meus irmãos, Juliene Pedreira Lima e Marco Antônio Lima, pelo amor, apoio, compreensão, conforto, incentivo e proteção em todos os momentos da minha vida.

À minha Família Pedreira, pelas orações, apoio e incentivo.

Ao orientador Prof. Dr. Aurélio Pessoa Picanço, pelos incentivos, confiança, respeito, dedicação e compreensão em todos os momentos dessa caminhada.

À co-orientadora Profa. Dra. Rose Mary Gondim Mendonça, pelo suporte, pelas suas correções, incentivos e pelo empenho incondicional, dedicado à elaboração deste trabalho.

Aos professores, Prof. Dr. Juan Carlos Valdés Serra e o Prof. Dr. João Evangelista Marques Soares, pela disponibilidade de tempo para a avaliação deste trabalho.

À esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior.

Ao meu Amigo (irmão), Cleber Decarli de Assis, pelo apoio e carinho fraterno, Ao chegar a esse momento, jamais poderia esquecer o quanto, no decorrer de tantos anos da minha vida, pude contar com o incentivo e ajuda de você.

Ao amigo Alexandre Cerqueira, pelo apoio e incentivo. Fica a minha gratidão pela valiosa contribuição nos ensaios laboratoriais e discussões técnicas sempre produtivas.

Aos grandes amigos e incentivadores Osvaldo de Freitas Neto, Marco Tulio do Nascimento, Paulo de Társo Pereira, Ledo Ivo José de Almeida, Neusirval Florentino de Souza e Raimundo Nonato da Silva Machado, pelos ensinamentos, conselhos e

oportunidades desde o início da minha carreira até os dias atuais. Agradeço acima de tudo pela amizade, confiança, apoio incondicional e por mostrarem ao longo de toda a minha vida os exemplos de conduta pessoal, profissional, assim como o caminho a ser trilhado nos momentos de maior dificuldade. Espero um dia poder retribuir ao menos uma parcela de tudo que me foi e oferecido

À todos os professores e mestres que passaram pela minha vida, sempre deixando uma semente e frutos que procuro colher no meu cotidiano.

Ao Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos (ITPAC), em especial, à toda a equipe do Laboratório de Solos pelas incansáveis ajudas no processamento do lodo para análise física.

À Odebrecht Ambiental (SANEATINS) em nome de todos os integrantes que apoiaram esta pesquisa.

À Cerâmica Santo Expedito por ceder toda a estrutura física para a fabricação das telhas.

“Não podemos caminhar sozinhos,  
nem nos entregarmos ao medo e  
aflições, porque temos em nós o  
dom de Deus.”

João (15,26)

## RESUMO

### **Caracterização de lodo da estação de tratamento de água utilizado como agregado na construção civil em elementos de telhas vermelhas**

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar e avaliar a viabilidade da utilização dos lodos da Estação de Tratamento de Água - ETA 006 da Cidade de Palmas, Tocantins – TO, Brasil, na incorporação à massa cerâmica para fabricação de telhas vermelhas. O lodo foi caracterizado por meio de análises físicas, mineralógica e química considerando os diferentes períodos sazonais do ano (chuvoso e estiagem). Posteriormente, foram produzidos corpos de provas com 0% e 10% de lodo e analisados os aspectos de absorção de água e carga de ruptura à flexão. Os resultados físicos mostraram que o lodo, independente do período de ano, é constituído principalmente de areia, apresenta baixa plasticidade e densidade. A caulinita é o argilomineral predominante. Os lodos têm uma perda de massa maior a uma temperatura mais baixa, em torno de 322°C. Apresenta composição química com predominância de SiO<sub>2</sub> (sílica), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de ferro). O lodo influenciou significativamente na qualidade das telhas, uma vez que a absorção de água tendeu a aumentar significativamente como a adição do lodo. Ao contrário da carga de ruptura das telhas que não apresentou diferença significativa com a adição do lodo, permanecendo dentro dos limites exigidos pela NBR 15310/2005. Portanto, os resultados mostram que o lodo tem ação desplastificante, sendo necessária a incorporação de uma quantidade baixa deste resíduo à mistura, podendo assim garantir a produção de produtos cerâmicos de boa qualidade técnica.

**Palavras-chave:** Lodo de ETA, Agregado descartado, Telhas cerâmicas, Aproveitamento de resíduos.

## ABSTRACT

### **Sludge characterization water treatment plant used as aggregate in construction in red tiles elements**

This study aims to characterize and evaluate the feasibility of using the sludge, from the Water Treatment Plant - ETA 006 Palmas - TO, Brazil, as a component of the ceramic body to manufacture red tiles. The sludge was characterized by physical, mineralogical and chemical analysis considering the different seasons of the year (wet and dry). Subsequently, test samples were produced with 0% to 10% of sludge and aspects of water absorption and flexural tensile strength were analyzed. The physical data showed that the sludge, regardless the period of the year, mainly consists of sand, it has low plasticity and density. Kaolinite is the dominant clay mineral in the sludge. The sludge has greater weight loss at a lower temperature, around 322°C. The sludge had chemical composition of predominantly SiO<sub>2</sub> (silica), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina) and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (iron oxide). The sludge significantly influenced the tiles quality. The water absorption tends to increase significantly with sludge addition. However, the breaking load showed no significant difference with the addition of sludge, remaining within the required limits of NBR. Therefore, the results show that the sludge acts decreasing the plasticity, so a plastic ceramic mass is needed, and thus it can guarantee a good technical quality ceramic products production.

Keywords: Sludge ETA, recycled aggregate, ceramic tiles, waste recycling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de uma ETA convencional e a geração de lodos na fase de sedimentação e de filtração, por meio da lavagem dos filtros. Adaptado de Wiecheteck e Cordeiro (2002). ....	21
Figura 2. Exemplo esquemático do modelo de telha plana de encaixe. ....	40
Figura 3. Exemplo esquemático do modelo de telha composta de encaixe. ....	40
Figura 4. Exemplo esquemático do modelo de telha simples de sobreposição. ....	41
Figura 5. Exemplo esquemático do modelo de telha plana de sobreposição. ....	41
Figura 6. Vista panorâmica da ETA 006 em Palmas-TO. ....	42
Figura 7. Bags de geotêxtil horizontais, dispostos na ETA 006 em Palmas-TO. ....	43
Figura 8. Fluxograma das etapas empregadas para incorporação de lodo de ETA na fabricação de cerâmica vermelha. ....	48
Figura 9. Equipamento utilizado para mistura da matéria prima na fabricação das telhas. ....	49
Figura 10. Telhas em processo de secagem. ....	49
Figura 11. Telhas submersas na água, no Campus da ITPAC em Porto Nacional - TO. ....	50
Figura 12. Dispositivo para aplicação de carga. ....	51
Figura 13. Composição granulométrica das matérias primas. ....	53
Figura 14. Difratoograma de raios X da massa cerâmica. ....	57
Figura 15. Difratoograma de raios X do resíduo de ETA do período chuvoso. ....	57
Figura 16. Difratoograma de raios X do resíduo de ETA do período de estiagem. ....	58
Figura 17. Difratoograma de raios X da mistura 90% massa cerâmica + 10% lodo do período chuvoso. ....	59
Figura 18. Difratoograma de raios X da mistura 90% massa cerâmica + 10% lodo do período de estiagem. ....	59
Figura 19. Curvas ATD/TG da massa cerâmica. ....	61
Figura 20. Curvas ATD/TG do resíduo de ETA no período chuvoso. ....	62
Figura 21. Curvas ATD/TG do resíduo de ETA no período de estiagem. ....	62
Figura 22. Curvas ATD/TG da mistura com 10% de lodo no período de chuvoso. ....	63
Figura 23. Curvas ATD/TG da mistura massa cerâmica + resíduo de ETA no período de estiagem. ....	63
Figura 24. Telha com 0% de lodo. ....	66
Figura 25. Telha com 10% lodo dos períodos chuvoso e de estiagem. ....	67
Figura 26. Absorção de Água, com base nos valores médios, para as diferentes condições de produção das telhas. ....	69

Figura 27. Valor médio de carga de ruptura à flexão para as diferentes condições de produção dos corpos de prova. ....	70
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais segmentos do setor cerâmico e os respectivos valores anuais de produção. ....	36
Tabela 2. Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha. ....	37
Tabela 3. Valores dos Limites de Atterberg para cada matéria primas e mistura. ....	54
Tabela 4. Valores de Massa Específica dos Grãos. ....	56
Tabela 5. Quantificação das fases cristalinas das matérias-primas. ....	56
Tabela 6. Comportamento térmico (ATD/TG) das matérias primas. ....	60
Tabela 7. Composição química, em porcentagem, das matérias primas em estudo. ....	64
Tabela 8. Valores de CTC e Matéria Orgânica para os lodos. ....	65
Tabela 9. Telhas produzidas. ....	66
Tabela 10. Valores médios de massa seca, massa úmida e absorção de água para as telhas produzidas em diferentes condições. ....	68
Tabela 11. Valores médios da carga de ruptura à flexão para as diferentes condições. ....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AA	Absorção de Água
Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
ANOVA	Análise de Variância
ATD	Análise Térmica Diferencial
Ca <sup>+2</sup>	Cálcio
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DRX	Difração de Raios-X
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FR	Carga de ruptura à flexão simples
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
H <sup>+</sup>	Hidrogênio
IBAMA	Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IP	Índice de Plasticidade
K <sup>+</sup>	Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
LL	Limite de Liquidez
LO	Lodo de ETA
LP	Limite de Plasticidade
MC	Massa Cerâmica
Mg <sup>+</sup>	Magnésio
Mn <sup>+</sup>	Mangânes
MPa	Mega pascal
M <sub>s</sub>	Massa seca
Um	Massa úmida
Na <sup>+</sup>	Sódio
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial de Saúde
PAC	Cloreto de Polialumínio
Pb	Chumbo
Ph	Potencial Hidrogeniônico
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNSB	Política Nacional de Saneamento Básico
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SANEAGO	Companhia de Saneamento de Goiás S.A.
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SV	Sólidos Voláteis
SiO <sub>2</sub>	Óxido de Silício
TG	Análise Termogravimétrica
°C	Graus Celsius
Δ	Massa específica dos grãos do material, em g/cm <sup>3</sup>

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	16
2. OBJETIVOS .....	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos.....	17
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	18
3.1. Qualidade da Água.....	18
3.2. Sistema de Tratamento de Água.....	18
3.3. Lodo de Estação de Tratamento de Água.....	21
3.3.1. Características do Lodo .....	22
3.3.2. Tratamento do Lodo.....	22
3.3.3. Legislação .....	24
3.3.4. Disposição final.....	25
3.3.5. Materiais Cerâmicos .....	35
3.3.6. Telhas .....	39
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	42
4.1. Coleta dos materiais .....	42
4.2. Secagem e Preparação dos materiais.....	44
4.3. Caracterização Física.....	44
4.3.1. Análise Granulométrica .....	44
4.3.2. Limites de Atterberg.....	45
4.3.3. Massa Específica dos Grãos .....	45
4.4. Caracterização mineralógica .....	46
4.5. Caracterização química .....	47
4.5.1. Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e Matéria Orgânica .....	47
4.6. Produção das Telhas.....	47
4.6.1. Formulação da Massa e produção das Telhas.....	48
4.7. Avaliação das Telhas.....	50
4.7.1. Avaliação visual .....	50
4.7.2. Absorção de água (AA) .....	50
4.7.3. Carga de ruptura à flexão simples (FR) .....	51

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
5.1. Caracterização física das matérias-primas .....	53
5.1.1. <i>Análise Granulométrica</i> .....	53
5.1.2. <i>Limites de Atterberg</i> .....	54
5.1.3. <i>Massa Específica dos Grãos</i> .....	56
5.2. Caracterização mineralógica .....	56
5.2.1. <i>Difratometria de raios X</i> .....	56
5.2.2. <i>Análise termogravimétrica</i> .....	60
5.3. Caracterização química .....	64
5.3.1. <i>Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e Matéria Orgânica</i> .....	65
5.4. Produção de Telhas .....	66
5.4.1. <i>Aspectos visuais</i> .....	66
5.4.2. <i>Absorção de Água</i> .....	68
5.4.3. <i>Carga de Ruptura à Flexão</i> .....	69
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

Os mananciais superficiais, principal fonte de abastecimento de água para consumo humano utilizado no Brasil, têm sido cada vez mais castigados com lançamentos de diferentes despejos, decorrentes da expansão dos centros urbanos. Com isso, a qualidade da água bruta piora, exigindo que maiores concentrações de produtos químicos sejam aplicadas no tratamento. Como consequência, observa-se o acréscimo na geração de rejeitos nas ETAs, conhecido como lodo (CORDEIRO, 2001).

Os lodos de ETA são classificados como resíduos sólidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004), onde seu lançamento “in natura” no meio ambiente é vedado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos- PNRS, disposta pela Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010).

Assim, se torna necessário o estudo da disposição final adequada do mesmo, afim de contribuir para diminuir impactos ambientais. Nesse sentido vem sendo realizado diversos estudos com vistas a identificar e desenvolver alternativas de minimização com o co-processamento dos resíduos, como por exemplo, o uso na construção civil, na incorporação ao cimento, em cerâmica vermelha ou na agricultura (HOPPEN *et al.*, 2005).

As indústrias de cerâmicas tradicionais utilizam como massa cerâmica materiais de natureza heterogênea, geralmente constituída de materiais plásticos e não plásticos, com um vasto espectro de composições. O aproveitamento de materiais residuais de vários tipos hoje já se faz presente, mesmo em porcentagens insignificantes (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Atualmente a ETA 006 produz diariamente um volume médio de 350 mg/l de lodo que fica retido em Bags Geotêxtil (HIDROSAN ENGENHARIA, 2011). A incorporação deste resíduo na fabricação de cerâmica vermelha é uma alternativa de destinação final que minimizaria os impactos causados pelo montante de lodo gerado. Além de contribuir para prolongar a vida útil das jazidas de extração de argila, sem comprometer a qualidade do produto, minimiza os custos nas indústrias, os passivos e impactos ambientais, e reduz as áreas para disposição final do lodo (COUTO, 2011).

Dessa forma, o presente trabalho tem como finalidade caracterizar o lodo proveniente da ETA 006 para possíveis destinações finais deste resíduo, verificando a viabilidade na incorporação na fabricação de cerâmica vermelha nas peças de telhas do tipo Plan.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Caracterizar o lodo da Estação de Tratamento de Água - ETA 006 e avaliar a viabilidade de sua incorporação na composição de massa cerâmica vermelha para fabricação de telhas.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Determinar as características físicas, químicas e mineralógicas do lodo com foco na sua aplicação em cerâmica vermelha;
- Comparar as características físicas químicas e mineralógicas do lodo nos diferentes períodos do ano (período chuvoso e período de estiagem).
- Verificar as alterações após a adição de lodo, na produção de cerâmica vermelha (telhas) quanto as características visuais, de absorção de água e de carga de ruptura à flexão.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Qualidade da Água**

O homem necessita de água de qualidade adequada e em quantidade suficiente para atender suas necessidades, para proteção de sua saúde e para propiciar o desenvolvimento econômico (BRASIL, 2007). No entanto, a água encontrada na natureza possui inúmeras impurezas que definem suas características físicas, químicas e biológicas, podendo ser imprópria para o consumo (LEME, 1990; HELLER e CASSEB, 1995).

Essas características da água estão associadas a uma série de processos que ocorrem na massa líquida e na bacia de drenagem do corpo hídrico, determinando assim a qualidade da água. Dentre esses processos, destaca-se a conjugação das capacidades de dissolução e de transporte de partículas presentes na água. Além disso, faz parte do sistema aquático as comunidades de organismos que em suas atividades metabólicas que provocam alterações físicas e químicas na água, enquanto outros sofrem os efeitos dessas alterações (BRASIL, 2006).

De acordo com a Portaria nº 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde, toda água destinada ao consumo humano, seja ela para ingestão, preparação e produção de alimentos, ou à higiene pessoal, independentemente de sua origem, deve ser potável (BRASIL, 2011).

A água para ser considerada potável deve atender a padrões de potabilidade definidos na Portaria nº 2.914 de 2011. De acordo com essa Portaria, os padrões de potabilidade são o conjunto de valores máximos permissíveis das características da água destinada ao consumo humano. Dentre esses padrões incluem características físicas, organolépticas, químicas e bacteriológicas (BRASIL, 2011).

Buscando atender a qualidade necessária para um determinado uso, o tratamento da água que tem por objetivo condicionar as características da água bruta ajustadas de forma a atender os padrões de qualidade exigidos pelo Ministério da Saúde e aceitos internacionalmente (HELLER e CASSEB, 1995).

#### **3.2. Sistema de Tratamento de Água**

Dentre esses sistemas destinados ao tratamento de água para consumo humano, o mais utilizado no Brasil é o convencional, também denominado ciclo completo (FREITAS *et al.*, 2005), principalmente em razão das variações sazonais das

características da água bruta, resultante, em grande parte, da deterioração dos mananciais de águas superficiais. O tratamento convencional entende-se a instalação potabilizadora que apresenta unidades distintas responsáveis pelos processos e operações do tratamento (BRASIL, 2006). Esse sistema compreende as seguintes etapas que são realizadas nessas ETAs:

### I. Coagulação

A coagulação é definida pelas mudanças físico-químicas produzidas pela dispersão, na água, de um coagulante solúvel que se hidrolisa em partículas carregadas positivamente, anulando as cargas negativas dos colóides, formando com eles os coágulos (SOUZA, 2007).

Uma substância bastante utilizada na coagulação é o sulfato de alumínio, que por meio de sua carga, é capaz de provocar a desestabilização de partículas (MOTA, 1997). Também são usados o cloreto férrico, sulfato ferroso, sulfato férrico e polímero sintético (MOTA, 1997).

As partículas removidas são as suspensas ou coloidais e são compostas de argila e outros materiais inorgânicos, substâncias orgânicas, bactérias, vírus e até os responsáveis pela cor da água (Di BERNARDO *et al.*, 1999a, MIRANDA, 2007).

### II. Flocculação

Ocorre após a coagulação e consiste no agrupamento das partículas eletricamente desestabilizadas, que são os coágulos, de modo a formar outras maiores, denominadas flocos (HELLER e CASSEB, 1995; SOUZA, 2007).

Segundo Heller e Pádua (2010) a finalidade desse processo não constitui na remoção de impurezas, apenas acondicionar a água que será encaminhada aos decantadores e aos filtros da ETA, aumentando o tamanho das partículas.

### III. Sedimentação

Martins (2014) define a sedimentação como um processo dinâmico de separação das partículas sólidas suspensas na água, pela ação da gravidade, dessa forma, tais partículas tenderão a sedimentar, se depositando no fundo dos tanques com uma velocidade controlada, em função do seu peso.

A remoção das partículas pequenas é realizada por meio da sedimentação simples nos pré-sedimentadores, já para as partículas flocculentas a sedimentação é também conhecida como decantação, e é realizada em decantadores (RICHTER, 2009). As

partículas que não são removidas na sedimentação, seja por seu pequeno tamanho ou por serem de densidade muito próxima à da água, deverão ser removidas na filtração (SANEAGO, 2006; MIRANDA, 2007).

De acordo com Heller e Padua (2010) esse processo está intimamente ligado aos processos de coagulação e floculação, sendo um processo que gera lodo.

#### IV. Filtração

Richter (2009) considera a filtração como o processo unitário mais importante na cadeia de processos de tratamento de água. É definida como um processo físico-químico e biológico utilizado para separar impurezas em suspensão na água, por meio da passagem por um meio poroso. Como meio poroso são utilizados diversos materiais granulares, tais como: areia, cascalho, antracito, carvão ativado granular, areia de granada (MOTA, 1997), terra diatomácea ou malha muito fina (LEME, 1990). O tamanho dos grãos e do vazio entre os grãos tem grande influência na remoção das impurezas e no desempenho hidráulico do filtro.

O material filtrante é lavado periodicamente por meio da injeção de água, em contracorrente (de baixo para cima), no leito filtrante. Com isto, é removido as impurezas (lodo) que ficaram retidas durante o processo de filtração (SANEAGO, 2006).

#### V. Desinfecção

Heller e Padua (2010) definem a desinfecção como processo de caráter corretivo e preventivo. No primeiro caso, objetiva-se a eliminação de organismos patogênicos que possam estar presentes na água, incluindo bactérias, protozoários e vírus. E no âmbito preventivo, é mantido um residual do desinfetante na água fornecida à população, para atuar preventivamente, caso ocorra alguma contaminação na rede de distribuição, e indicar a qualidade da água distribuída.

#### VI. Correção do PH

A correção do pH consiste no equilíbrio químico da água, de modo que ela saia da estação de tratamento de água sem características corrosivas ou incrustantes. É efetuada na passagem da água em tratamento do tanque de contato para o reservatório de compensação (SANEAGO, 2006), buscando a integridade das instalações domiciliares e do sistema de distribuição (HELLER e PADUA, 2010).

## VII. Fluoretação

A fluoretação é definida por Souza (2007) como o processo de complementação do teor de flúor na água, e tem como objetivo atingir as concentrações ideais para redução das cáries dentárias, conforme Lei nº 6.050 (BRASIL, 1974).

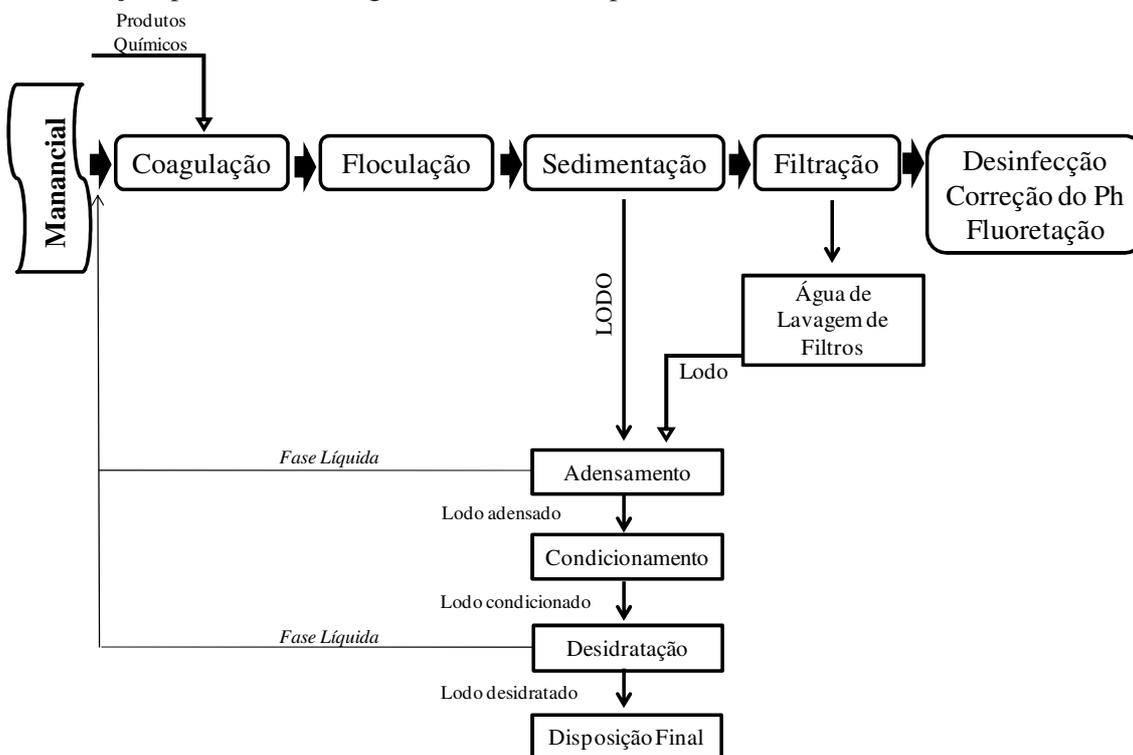
### 3.3. Lodo de Estação de Tratamento de Água

As ETAs produzem água potável para abastecimento e, como subprodutos do tratamento, lodos dos decantadores e águas de lavagens dos filtros. A Figura 1 o funcionamento de uma ETA convencional.

No Brasil, existem cerca de 7.500 ETAs (CORDEIRO, 2001), gerando lodo a partir da lavagem dos filtros, dos decantadores e da limpeza dos tanques de produtos químicos (CORDEIRO, 1999b). De acordo com Porras *et al.* (2008), a porcentagem de lodo removido dos decantadores representa em torno de 0,2% a 5% do volume total de água tratada, além do lodo gerado da lavagem dos filtros, em qual, dependendo do processo, corresponde a 5% a 10% do volume total tratado.

Além dos coagulantes, a presença de carvão ativado em pó, cal e polímeros é comum nos lodos gerados nas ETAs (TSUTIYA e HIRATA, 2001).

**Figura 1.** Fluxograma de uma ETA convencional e a geração de lodos na fase de sedimentação e de filtração, por meio da lavagem dos filtros. Adaptado de Wiecheteck e Cordeiro (2002).



### *3.3.1. Características do Lodo*

O lodo gerado nas ETAs de sistema completo apresenta características bastante variadas, em função: da qualidade da água bruta a ser tratada, incluindo as partículas presentes na água bruta, que conferem turbidez e cor à mesma; da dosagem e dos produtos químicos utilizados em seu tratamento; do tempo de permanência do lodo nos tanques; da forma de limpeza dos decantadores; da eficiência da sedimentação; entre outros (CORDEIRO, 1999a; 2001).

Esse lodo é composto basicamente de sedimento e siliciclástico (areia, silte, argila), material orgânico carreado para água bruta, subprodutos gerados da adição de produtos químicos e água, além dos metais: alumínio, ferro e outros carreados por meio do escoamento superficial (CORDEIRO, 2001; FONTANA, 2004).

Os produtos químicos empregados no tratamento também podem conter pequenas concentrações de impurezas que serão transportadas para o resíduo do decantador (CORDEIRO, 2001).

Assim como há variação da água bruta devido à sazonalidade, o lodo apresenta um aumento da matéria orgânica e decréscimo do conteúdo mineral no período chuvoso e o inverso na estiagem (OLIVEIRA, 2010).

O lodo gerado caracteriza-se por possuir grande umidade, geralmente maior que 95%, estando de maneira geral, sob forma fluida (CORDEIRO, 1999a) e ser formado basicamente de partículas do tipo colóides que apresentam tamanho que varia de 1nm a 1mm, conferindo à água cor e turbidez (CORDEIRO, 2001).

De acordo com Fontana (2004), o tamanho da partícula influencia na redução do volume, além de influenciar diretamente na resistência específica que dificulta a remoção da água do lodo.

Guimarães (2007) relata que a concentração de sólidos determina a consistência do lodo gerado na ETA, que se apresenta como líquido nos pontos de geração até uma consistência similar a argila, utilizada na produção de cerâmica, na torta obtida em centrifugas, ou ainda com material quebradiço, nos leitos de secagem

### *3.3.2. Tratamento do Lodo*

É de fundamental importância a adequação dos sistemas de saneamento no que diz respeito à destinação adequada dos resíduos produzidos pelas ETAs.

Com isso, busca-se reduzir o volume desse resíduo, por meio da remoção de água para concentrar os sólidos (WIECHETECK; CORDEIRO, 2002), facilitando a disposição

de forma adequada, diminuindo custos de transporte, disposição final e, os riscos de poluição do meio ambiente (CORDEIRO, 1999a).

De acordo com Wiecheteck e Cordeiro (2002), as etapas empregadas para separação do sólido-líquido são: adensamento, condicionamento, desidratação e disposição final (Figura 1), conforme descrito abaixo.

- Adensamento

Essa etapa é uma das operações unitárias mais importantes do processo de tratamento, pois dela dependem as operações de condicionamento e desidratação (OLIVEIRA, 2010). Consiste na produção do lodo mais concentrado, que pode ser obtido a partir da adição de polímeros, buscando, assim, maior remoção de água. Os adensadores podem ser por gravidade, flotação com ar dissolvido ou adensadores de esteiras (mecanizados).

- Condicionamento

O condicionamento de resíduos de ETAs pode ser feito com o auxílio de polímeros. Os polímeros podem ser naturais (amidos) ou sintéticos, podendo ser classificados segundo a carga elétrica que possuem em solução aquosa (catiônicos, aniônicos e não iônicos), densidade de carga elétrica (baixa, média e alta), ou de acordo o peso molecular (baixo, médio, alto e muito alto) (GUIMARÃES, 2007). No entanto este mesmo autor alerta que para melhorar a desidratabilidade dos lodos geralmente é aplicado apenas um tipo de polímero.

- Desidratação

É a redução do volume de lodo adensado e condicionado para fins de disposição final. Pode ser realizado por meio da secagem natural: leitos de secagem, lagoas de lodo, *Bag's*, ou por meio mecânico: filtro prensa, centrífuga, filtro a vácuo, prensa desaguadora (TSUTIYA e HIRATA, 2001; OLIVEIRA, 2010).

Os processos naturais são utilizados, particularmente, em ETAs de pequeno e médio porte, onde haja áreas disponíveis e condições climáticas favoráveis, caracterizam-se pela facilidade operacional e baixo custo. Já sistemas mecanizados são indicados para estações maiores e sem disponibilidade de área; são sistemas que apresentam custo maior e exigem mão-de-obra qualificada (OLIVEIRA, 2010).

Os sistemas naturais para remoção de água livre de lodos de ETAs podem ser de grande aplicação no Brasil. Esse fato se deve principalmente pelas condições climáticas apresentadas no país (CORDEIRO, 1999b).

Os *BAG's* são tecnologias de desaguamento de lodos de ETAs que teve origem na Holanda, na construção de diques de contenção. São constituídos de tecido de polipropileno de alta resistência capazes de suportar altas pressões na fase de enchimento. Suas superfícies são capazes de drenar a água contida no lodo. É um sistema que funciona em três fases. Fase 1 - Confinamento: o lodo é bombeado para o interior do tubo; Fase 2 - Desaguamento: a água contida no lodo condicionado é liberada para a área externa passando pela membrana geotêxtil; e Fase 3 - Consolidação: após o preenchimento total do *BAG*, o mesmo permanece em repouso por meses, para aumentar o teor de sólidos do lodo no seu interior (MIKI *et al.*, 2006).

### 3.3.3. Legislação

A Resolução CONAMA nº 357 de 2005 determina o comprimento do lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora, direta ou indiretamente nos corpos d'água. Estas condições impedem o lançamento, sem prévio tratamento, do lodo produzido nas ETAs, devido à grande concentração de sólidos sedimentáveis neste resíduo.

Os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, e os líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento nos corpos de água são definidos e classificados, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) como resíduos sólidos em diferentes níveis de periculosidade, considerando possíveis riscos ambientais e à saúde pública, devendo, assim, serem devidamente tratados e dispostos (DI BERNARDO *et al.*, 1999b).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, instituída pela Lei nº 12.305, dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Essa lei proíbe o lançamento de resíduos sólidos em qualquer corpo d'água como forma de destinação ou disposição final (BRASIL, 2010).

Santos *et al.* (2000), por meio de análise do lodo da ETA de São Leopoldo, classificaram-o como “Classe II A - Não inertes”, visto que a concentração de vários parâmetros apresentaram-se acima do máximo aceito, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004). Di Bernardo *et al.* (1999a), cita que em ensaios de lixiviação e solubilidade do lodo de duas ETAs em São Paulo, também classificaram o lodo como “Classe II A - Não inertes”, devido as concentrações de alumínio, ferro e manganês presentes no lodo

estarem acima dos limites estabelecidos na norma para classificação como resíduo sólido inerte.

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, estabelece que estão sujeitos à aplicação dos instrumentos de outorga e cobrança pelo uso, o lançamento de resíduos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final em corpos d'água, além de outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água (BRASIL, 1997).

A Política Nacional de Saneamento Básico - PNSB, instituída pela Lei nº 11.445, estabelece diretrizes para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico (BRASIL, 2007). De acordo com Lopes (2013), esta lei trouxe um avanço significativo no que se refere à gestão dos efluentes gerados nos processos de tratamento de água e esgoto.

Já a Lei nº 9.605, Lei de Crimes Ambientais, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Esta Lei, no Artigo 54, determina que o cometimento de crime que possa vir a causar poluição de qualquer natureza em níveis que resultem ou possam resultar em danos a saúde humana ou ao meio ambiente, ocasionada pelo lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, incorrerá em pena de reclusão, de um a cinco anos (BRASIL, 1998).

#### *3.3.4. Disposição final*

Os resíduos gerados com o tratamento da água devem ter uma destinação adequada. Várias são as possibilidades de utilização ou disposição desses resíduos, e a escolha da melhor alternativa depende de critérios e ainda da localização da estação e dos possíveis pontos de destino (GUIMARÃES, 2007).

Oliveira (2010) ressalta que a tecnologia de tratamento e disposição do lodo deve ser compatível com as condições locais, com a disponibilidade de área, localização, existência de mão-de-obra qualificada e principalmente ser técnica e economicamente viável.

Segundo Guimarães (2007), diversos são os fatores que afetam a remoção de água dos lodos. Lodos que tem em sua composição sulfato de alumínio, utilizado como coagulante, ou lodos que contenham algas, a desidratabilidade é substancialmente comprometida, o que pode implicar nas questões legais, ambientais e financeiras envolvidas nas etapas de tratamento, transporte e disposição final.

O tratamento e a disposição benéfica de lodos de ETAs vêm sendo tratado como oportunidade de aumento de receita e principalmente, redução de custos e de impactos ambientais em empresas de saneamento básico de todo o mundo (TSUTIYA e HIRATA, 2001).

Apesar de diversos estudos estarem em andamento na busca pela melhor forma de dispor o lodo, minimizando ao máximo os impactos ambientais causados devido às diversas características apresentadas por estes resíduos, ainda existe muitas lacunas quanto a maneira mais benéfica de dispor o lodo (Andrade *et al.*, 2014).

Takada *et al.* (2013) elencaram como os usos de maior potencial de utilização do lodo de ETA no Estado do Tocantins: disposição em estação de tratamento de esgoto; aterros sanitários; disposição controlada em certos tipos de solos; co-disposição com biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos; incineração dos resíduos; recuperação de áreas degradadas; bem como aplicações industriais diversas tais como fabricação de tijolos ou outros materiais de construção.

#### *I. Disposição de lodo de ETA em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)*

A disposição dos resíduos gerados nas ETAs em ETEs é um método alternativo bastante difundido em alguns países da Europa e nos Estados Unidos, sendo lançado por meio de rede coletora de esgoto ou transportado em caminhão (DI BERNARDO *et al.*, 1999b).

Di Bernardo *et al.* (1999b) relatam ainda que é um método aparentemente econômico, visto que, exclui a obrigação de implantar um sistema de tratamento de resíduos nas próprias ETAs. Por outro lado, é uma forma de transferir a gestão do lodo gerado na ETA para a administração da ETE.

Contrariamente ao exposto acima, Drumond (2013) avaliando a aplicação do resíduo de estação de tratamento de água (ETA) no sistema de esgotamento sanitário, verificou que a adição do resíduo de ETA não provocou interferência significativa ou inibidor para os organismos aeróbios inoculados, mantendo satisfatória a biodegradabilidade do conjunto de lodo de ETA e de esgoto sanitário. Concluindo que esse consórcio se configura em vantagens no gerenciamento dos resíduos sólidos da ETA e ETE num mesmo local, até mesmo como forma de minimizar impactos e custos operacionais.

Omoto (2000) também obteve resultados que comprovaram que o lodo da ETA apresenta contribuições positivas ao tratamento do esgoto em ETEs. Ele verificou redução significativa na turbidez do esgoto bruto com adição do lodo, e redução em torno de 35% do índice de fósforo. Foi possível observar ainda, que o lodo da ETA não afetava a atividade microbiológica, e que os sólidos existentes não alteraram o escoamento do efluente nem interferiram no bombeamento, em função dos sólidos presentes no lodo da ETA serem finos o bastante e não causarem acúmulo no poço ou provocarem danos à bomba.

Embora se tratando de uma alternativa econômica, Januário e Ferreira Filho (2007) advertem que as ETEs deverão ser preparadas para o aumento do volume de lodo a ser processado em seu sistema de desidratação, bem como nos seus custos de transporte e disposição final.

## *II. Aplicação na agricultura*

A utilização de lodo como insumo agrícola tem proporcionado inúmeros benefícios por meio do fornecimento de nutriente e matéria orgânica ao solo, além de promover alteração nas propriedades físicas do solo, como, a formação de agregados das partículas do solo, que por sua vez, aumentam o tamanho dos espaços vazios, trazendo conseqüências diretas na melhoria da infiltração e retenção de água; permitindo também uma maior capacidade de aeração (TSUTIYA *et al.*, 2002).

A utilização do lodo de ETA na agricultura foi analisada por Machado *et al.* (2004), em que foi constatada a presença de matéria orgânica, macronutrientes (nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre) e micronutrientes (boro, cobre, ferro manganês, zinco) nesse resíduo. Quando comparado os valores encontrados no lodo aos valores dos compostos constituintes dos resíduos orgânicos de lixo urbano e de esterco bovino, usualmente utilizados como insumos agrícolas, o lodo apresentou valores inferiores. No entanto, quando comparado à composição do solo da região em estudo, os valores de nitrogênio, fósforo, potássio e matéria orgânica encontrados no lodo foram superiores. Dessa forma, o autor indica a utilização do lodo para fins agrícolas, pois a composição desse resíduo apresenta elementos essenciais ao desenvolvimento dos vegetais.

Figueiredo Neto (2011) utilizou diferentes dosagens de lodo de ETA para produção de mudas de plantas nativas do cerrado em viveiro e observou pequenas

variações morfológicas nas plantas em decorrência à exposição a diferentes concentrações de lodo, demonstrando assim, potencial do lodo no cultivo de mudas. Observou ainda, diminuição da concentração de alguns elementos na parte aérea das plantas (nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio) e aumento do acúmulo de metais pesados nas mesmas (cobre e enxofre).

### *III. Aplicação na recuperação de áreas degradadas*

A aplicação de lodo de ETAs no solo visando a recuperação de áreas degradadas e para fins agrícolas vêm sendo nos últimos anos estudadas, podendo ser uma alternativa viável de disposição (ANDRADE *et al.*, 2014), muito embora a capacidade desse lodo como fertilizante seja menor que a dos lodos oriundo de esgoto. Além disso, a composição dos lodos das ETAs pode modificar a retenção de água e as propriedades estruturais do solo (BIDONE *et al.*, 2001).

O uso do lodo para a recuperação de áreas degradadas é uma alternativa promissora, já que as altas concentrações de fósforo (P) e de matéria orgânica verificadas no lodo químico da ETA Rio Descoberto foram transferidas para os horizontes mais profundos do solo de uma cascalheira possibilitando o desenvolvimento da vegetação no local. Além disso, a matéria orgânica contribui ainda para a imobilização do alumínio (Al) e chumbo (Pb), reduzindo a sua toxicidade para as plantas (MOREIRA *et al.*, 2007).

Bittencourt *et al.* (2012) avaliando o efeito da aplicação de lodo de ETA em solo degradado na produtividade do milho e nas características de fertilidade desse solo observaram que este lodo não tem efeito sobre a produtividade de milho, tampouco sobre os teores dos elementos avaliados no solo. Eles sugeriram ainda que aplicação de lodo de ETA em solos como forma de destinação final do material seja encarada como forma potencial de melhoria nos atributos de fertilidade do solo, e sim como uma forma de aplicação controlada do lodo no solo.

Moreira *et al.* (2009) verificaram que altas concentrações de manganês (Mn) no lodo de ETA eram transferidas para a cascalheira na área degradada, e que tal elemento era proveniente do coagulante químico utilizado no processo de tratamento da água.

Em cidades pequenas, onde a produção de lodo é baixa, a utilização do lodo para produção de mudas de árvores nativas em viveiro para recuperação de áreas degradadas é uma forma de gerar renda para a população local (FIGUEIREDO NETO, 2011).

#### IV. Aterro sanitário

O aterro é uma forma de disposição de resíduos no solo que garante um confinamento seguro no que diz respeito à poluição ambiental e à saúde pública. É um empreendimento fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas (PRIM, 2011).

A disposição de lodo de ETAs em aterros sanitários é uma alternativa que requer bastante precaução, já que a seleção do resíduo sólido a ser disposto com o lodo é uma etapa fundamental.

A disposição de lodos de ETAs e resíduos sólidos estritamente orgânicos em altas proporções favorecem a lixiviação do alumínio (Al), propiciada pelas altas concentrações de ácidos graxos voláteis no meio. Ao contrário da disposição do lodo em células com baixo conteúdo de resíduos orgânicos, que apresenta uma possibilidade de tratamento para o resíduo, sem riscos de lixiviação potencial de alumínio (Al) para o ambiente. Assim, é importante optar disposição do lodo em aterro sanitário consorciado com resíduo sólido orgânico de degradação lenta e baixa produção de ácidos graxos, utilizando-se, particularmente, lixo urbano ou materiais inertes a fim de se aproximar da situação real (BIDONE *et al.*, 2001).

Guerra e Angelis (2005) verificaram a possibilidade de disposição do lodo de duas ETAs, em São Paulo, em aterro sanitário. Com base nos resultados, o lodo quando misturados ao solo utilizado na cobertura das células do aterro sanitário não interferiu negativamente no processo de biodegradação, indicando a viabilidade da disposição nesse local.

Antes de escolher o aterro como destino final, Guerra (2005) recomenda realizar estudos que forneçam dados referentes a melhor concentração de sólidos e proporção de aplicação do lodo, para atingir as condições estruturais e de suporte necessárias à operação do aterro sanitário.

A utilização do lodo de ETA e ETE em camadas de cobertura de aterro sanitário foi analisada por Castilhos Junior *et al.* (2011). O lodo de ETA e ETE misturados foram estabilizados com cal virgem, devido os lodos in natura possuírem alto teor de sólidos voláteis, umidade e microorganismos patogênicos, não apresentando qualidade suficiente para ser utilizado diretamente como material de cobertura. Eles verificaram que a adição dos lodos resultou em aumento da granulometria, redução do índice de plasticidade e da massa específica dos grãos. A cal adicionada reagiu com os minerais argilosos presentes no lodo, conferindo ação cimentante a mistura.

Prim (2011) também verificou a viabilidade do aproveitamento dos lodos gerados em estações de tratamento de água e esgoto na cobertura em aterro sanitário. O lodo de ETE e ETA higienizados com 5, 10 e 15% de alcalinizante, não alcançou as características geotécnicas necessárias, mas com a adição de solo argiloso na mistura o comportamento assemelhou-se aos de um solo natural usado em cobertura de aterro. Além disso, essa mistura apresenta nutrientes em sua composição que favorece o desenvolvimento de plantas e a proteção contra erosão hídrica.

Tal alternativa de uso apresenta diversas vantagens, dentre elas: redução de custos na aquisição de material para cobertura em aterros, melhoria na qualidade do lixiviado, e aporte de nutrientes para camada vegetativa (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2011).

Januário e Ferreira Filho (2007) recomendam o planejamento na utilização de aterros sanitários, mesmo que se tenha adotado outras alternativas de disposição final do lodo, visto que necessidades emergenciais ocasionadas por variações bruscas na quantidade ou qualidade dos lodos possam comprometer a destinação ora em uso.

#### VI. *Recuperação de Coagulantes*

A recuperação de coagulantes a partir dos lodos produzidos, seguida da reciclagem do coagulante regenerado na estação de tratamento e disposição do lodo em aterro constitui em uma das práticas eficientes para o descarte de lodo de ETAs, uma vez que a solubilização desses coagulantes e sua reciclagem permitem minimizar os custos e os problemas associados à disposição final desses resíduos. A recuperação dos coagulantes, cerca de 35 a 50% dos sólidos presentes no lodo, além de diminuir o seu volume (GONÇALVES *et al.*, 1999).

A recuperação pode ser realizada a partir de algumas tecnologias disponíveis, tais como: recuperação pela via ácida, recuperação pela via alcalina, extração com solventes orgânicos e extração com quelantes (GONÇALVES *et al.*, 1999).

A recuperação por via ácida é utilizada em grande escala em alguns países do hemisfério norte (TSUTIYA e HIRATA, 2001).

Gonçalves *et al.* (1999) relatam ainda que para a recuperação dos coagulantes ser efetiva, ou seja, ocorrência da solubilização dos compostos de alumínio ou ferro que possuem potencial de coagulação, é necessário que o lodo seja exposto a pH inferior a 2 ou superior a 10. Teoricamente, 100% do alumínio pode ser solubilizado em pH 2, porém,

a porcentagem do alumínio recuperado irá depender da eficiência do processo de desidratação do lodo (TSUTIYA e HIRATA, 2001).

De Julio *et al.* (2009) analisando a regeneração do coagulante do lodo da ETA de Pitangui no Paraná, em que utiliza o coagulante primário o cloreto de polialumínio (PAC), verificaram que a regeneração do coagulante por via ácida pode ser considerado um processo de fácil operação, no qual é obtido um coagulante com eficiência semelhante aos coagulantes comerciais. Eles verificaram ainda que quando aplicado o coagulante regenerado no efluente da lagoa de polimento de uma ETE da SANEPAR, ocorreu remoção significativa de partículas em suspensão (turbidez) e, conseqüentemente, diminuição na concentração de sólidos e matéria orgânica. Obtiveram também, redução significativa na concentração de fósforo, nutriente fundamental no processo de eutrofização dos corpos d' água. Assim, concluíram que o coagulante regenerado pode ser empregado no pós-tratamento físico-químico de águas residuárias.

Tsutiya e Hirata (2001) alertam ainda para o controle de metais pesados e compostos orgânicos, tanto no lodo quanto na água tratada, uma vez que a solubilização pode disponibilizar-los à fase líquida, causando riscos à saúde humana.

#### VII. *Reaproveitamento do lodo na construção civil*

A aplicação do lodo de ETA como matéria-prima vem sendo cada vez mais estudado como uma alternativa viável para utilização na construção civil, em virtude da semelhança dos lodos de ETAs com materiais argilosos (PEREIRA, 2011). Diversos materiais podem ser adquiridos com a utilização desse resíduo incorporado a matrizes de argamassa e concreto e à massa cerâmica, dentre eles: contrapisos, blocos, placas de vedação, peças decorativas, calçadas, pavimentos residenciais, artefatos, peças de concreto (como placas de estai para redes de distribuição de energia elétrica, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, e pedestais para apoio de equipamentos), construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido), tijolos, telhas, manilhas (HOPPEN *et al.*, 2005).

Com base em resultados obtidos nos parâmetros de resistência à compressão axial e absorção de água, Sales e Cordeiro (2001) recomendam adição de lodo de ETA como matéria-prima na fabricação de concretos e argamassas para diversas aplicações na construção civil, desde que sejam materiais não-estruturais, tais como produção de contrapisos, produção de argamassas para assentamento de componentes e confecção de

blocos de concreto não estrutural, pois estes atendem aos requisitos mínimos exigidos para o desempenho mecânico e à durabilidade. Eles citam ainda outras aplicações que também não exigem resistência elevada, tais como: guias, sarjetas e componentes de drenagem, entre outros elementos de infra-estrutura urbana.

Rodrigues e Holanda (2013) avaliaram a viabilidade da adição de lodo de ETA na fabricação de tijolo solo-cimento para uso na construção civil. Verificaram que o lodo de ETA tende a aumentar o teor de partículas finas (principalmente de caulinita), matéria orgânica e plasticidade da mistura solo-cimento. Tais alterações interferiram na hidratação do cimento, no entanto, a substituição parcial de até 1,25% de lodo em peso de solo na fabricação do tijolo ainda foi viável.

Porras *et al.* (2008) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de avaliar a viabilidade da utilização dos lodos de ETA da Cidade de Campinas/SP juntamente com o agregado reciclado miúdo de resíduo da construção civil para fabricação de tijolos estabilizados com cimento. Foram realizadas várias composições cujas proporções mássicas entre o cimento, o agregado reciclado miúdo e lodo tenderam a maximizar a quantidade do lodo e reduzir a quantidade de cimento. O teor ideal de umidade do lodo para a mistura também foi analisada. Foi observado que a umidade influenciou na qualidade dos tijolos, onde somente lodos com valores de umidade inferiores a 50% permitiram a confecção do tijolo. Os tijolos produzidos nas condições estudadas atenderam simultaneamente aos requisitos das normas brasileiras de qualidade - dimensões, absorção de água e resistência à compressão.

Sales e Cordeiro (2001) fizeram um comparativo dos custos relativos com a fabricação de argamassa utilizando as matérias primas comuns (Tipo B) e a argamassa produzida com a adição de resíduos (Tipo A). Eles mostram que é possível fabricar argamassa de assentamento de cimento, utilizando para isso argamassa incorporada com entulho de construção e lodo de ETAs, e verificam que a utilização desta argamassa diminui em pelo menos 22% os custos quando comparado com a confecção de argamassa de assentamento tradicional. Essa redução é possível considerando o custo zero para a obtenção dos resíduos, principalmente se estes forem utilizados no próprio local de sua geração.

### *VIII. Reaproveitamento do lodo na produção de cerâmica vermelha*

Os resíduos industriais de origens variadas, dentre eles, o lodo gerado no tratamento de água para abastecimento, tem sido largamente avaliado para incorporação

na fabricação de cerâmica vermelha, assegurando a qualidade ao produto final. Além do aproveitamento desses materiais, cujo destino final é onerosa e difícil para as empresas, em meio à grande quantidade de lodo gerada, por meio da incorporação desses resíduos à cerâmica vermelha, essa destinação pode contribuir na diminuição da quantidade de argila consumida na fabricação desses materiais, conseqüentemente, diminuir o custo da matéria-prima para produção da cerâmica (PAIXÃO *et al.*, 2008; VIEIRA e MONTEIRO, 2009; COUTO, 2011).

Couto (2011) analisando a viabilidade de aproveitamento do lodo gerado na ETA Itaipava, para incorporação na fabricação de materiais cerâmicos verificou que a adição de 10% em peso de lodo de ETA é o máximo permitido, uma vez que esta quantidade não compromete a resistência dos corpos de prova em relação à argila pura. Já a adição de 20% e 30% de lodo à massa cerâmica provocou um aumento na porosidade, na absorção de água do material e menores valores de Tensão de Ruptura à Flexão.

Tartari *et al.* (2011a) caracterizou o lodo gerado na ETA Tamanduá e a argila visando a viabilidade da incorporação do lodo em massas para cerâmica. Eles verificaram que o lodo não pode ser usado como componente principal em massas cerâmicas, mas pode ser incorporado como aditivo em massas argilosas. Eles recomendam ainda na segunda parte deste trabalho (Tartari *et al.*, 2011b) a utilização do lodo à massa com umidade real de saída da centrífuga. Segundo os autores, a preparação da massa para fabricação de cerâmica vermelha por meio processo de extrusão mostrou-se viável, contribuindo para a redução da exploração da matéria-prima argila, assim como para a economia na adição de água no processo de produção de cerâmica.

Para o lodo gerado na ETA em Campos dos Goytacazes/RJ, Oliveira *et al.* (2004) verificaram que o lodo pode ser considerado como sendo uma formulação de massa argilosa natural, já que apresentou característica físico-químico e mineralógico semelhante ao de algumas argilas caulínicas da região de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. No entanto, estes autores recomendam a utilização do lodo somente como constituinte de formulações argilosas adicionado em quantidades adequadas, visto que apresenta alto valor do índice de plasticidade (IP = 20%).

A influência do lodo de ETA nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha, a partir de uma série de misturas argila/lodo contendo até 15% de lodo, também foi verificada por Oliveira e Holanda (2008). Eles observaram que a adição do resíduo nesta porcentagem não causa efeitos significativos nas propriedades físico-mecânicas da

massa cerâmica padrão, assim como também não foi observada influencia na incorporação do lodo sobre a microestrutura das peças de cerâmica.

Dependendo da proporção da adição do lodo de ETA as características físicas e mecânicas de uma massa cerâmica podem ser comprometidas, no entanto, a fração pode ser aumentada desde que seja realizado o beneficiamento do lodo por calcinação e/ou moagem, diminuindo assim o efeito deletério das partículas do lodo na resistência mecânica (PAIXÃO *et al.*, 2008).

A viabilidade de incorporação do lodo gerado na ETA de Rio Claro na argila utilizada como matéria-prima na produção de cerâmica vermelha foi verificada por Moruzzi e Ferrari (2008). Eles observaram que o aumento da concentração de lodo à massa cerâmica prejudicou de forma exponencial os parâmetros de absorção de água e módulo de Ruptura à Flexão, que são considerados os mais importantes na determinação da qualidade das peças cerâmicas.

Vitorino *et al.* (2009) analisaram a viabilidade de incorporação de 10% de lodo de ETA na fabricação de cerâmica argilosa e verificaram que o lodo proveniente do decantador afetou as propriedades físicas e mecânicas com exceção da plasticidade da cerâmica, sugerindo assim a necessidade de incorporar quantidades que possibilitem à cerâmica alcançar os valores estipulados por norma para determinado tipo de produto.

Siqueira Junior (2011) analisando a viabilidade da incorporação do lodo da ETA Botafogo em Pernambuco para fabricação de tijolo vermelho verificou que o lodo é um composto que otimiza as propriedades mecânicas e físicas dos materiais cerâmicos, tornando-o um grande potencial para aproveitamento na indústria de tijolos cerâmicos, no entanto, existe a necessidade de utilizar processos que eliminem o material orgânico contido no lodo.

Teixeira *et al.* (2002) testaram a adição do lodo de ETAs, que utilizaram como coagulante o hidróxido de alumínio e o cloreto férrico, e do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) na incorporação à massa cerâmica para produção de tijolo e verificaram que quanto maior a concentração adicionada destes resíduos à massa cerâmica menores foram os valores de tensão de ruptura à reflexão e maiores os valores de absorção de água, ou seja, concentrações de lodo tendem a comprometer as propriedades físicas e tecnológicas da massa cerâmica. Ainda assim, os autores não condenam a utilização qualquer um dos três lodos incorporados à massa cerâmica para produção de tijolos maciços sem comprometer suas propriedades físicas, mas recomendam cautela ao utilizar,

pois a qualidade do produto vai depender das características do lodo, da concentração utilizada e da temperatura de queima.

No entanto, Januário e Ferreira Filho (2007) lembram que a efetiva utilização do lodo para a produção de cerâmica vermelha estará atrelada à aceitação e ao custo por parte das indústrias cerâmicas e consumidores finais. Visto que, o custo será influenciado pelas condições em que a matéria prima será obtida (distância da jazida e aspectos ambientais) e pelas facilidades ofertadas pela companhia de saneamento (transporte até a indústria ou retirada na ETA e vantagem econômica para a indústria).

### 3.3.5. *Materiais Cerâmicos*

A indústria cerâmica brasileira tem participação de 1% no Produto Interno Bruto – PIB, o que vem a representar um setor de grande importância para o país. De acordo com a Tabela 1 essa indústria está dividida em diversos segmentos os quais diferenciam pelos produtos obtidos. Este segmento integra o ramo de produtos de minerais não-metálicos da Indústria de Transformação, fazendo parte, do conjunto de cadeias produtivas que compõem o Complexo da Construção Civil. É responsável pela produção de uma grande variedade de materiais, como blocos de vedação e estruturais, telhas, tijolos maciços e furados, lajotas e tubos, manilhas e pisos rústicos (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000; COELHO, 2009).

Ainda de acordo com os autores a indústria cerâmica consome cerca de 60.000.000 de toneladas de argila por ano, o que vem colocar o Brasil entre os maiores produtores e consumidores mundiais desta matéria prima.

O Brasil possui grandes depósitos de argilas para cerâmica vermelha, que estão distribuídas por todo o seu território, sendo que essa matéria-prima representa entre 40 a 50% das substâncias minerais produzidas no país (SEBRAE, 2008). Coelho (2009) classifica os depósitos de argila em dois tipos: argilas quaternárias e argilas de bacias sedimentares. As argilas quaternárias, relacionadas ao preenchimento de fundo de vales e às planícies costeiras, formam depósitos lenticulares, com espessuras de porte métrico e distribuição em áreas que podem variar de poucos hectares até quilômetros quadrados, variando de acordo com a extensão da planície de inundação. Caracterizam-se pela elevada umidade e alta plasticidade, propiciando boa trabalhabilidade para os processos cerâmicos de conformação plástica, a exemplo dos produtos estudados, tais como tijolos e telhas (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2005).

**Tabela 1.** Principais segmentos do setor cerâmico e os respectivos valores anuais de produção.

<b>Segmento</b>	<b>Valor de Produção (1.000 US\$/Ano)</b>
Cerâmica Estrutural (Vermelha)	2.500.000
Revestimentos (pisos e azulejos)	1.700.000
Matérias Primas Naturais	750.000
Refratários	380.000
Cerâmica Técnica, Especiais, outras	300.000
Sanitários	200.000
Louça de Mesa e Adorno	148.000
Fritas, Vidrados e Corantes	140.000
Matérias Primas Sintéticas	70.000
Cerâmica Elétrica	60.000
Equipamentos para Cerâmica	25.000
Abrasivos	20.000
<b>Total do Setor</b>	<b>6.293.000</b>

Fonte: Bustamante e Bressiani (2000)

Já as argilas de bacias sedimentares, também conhecidas como formacionais, estão relacionadas às unidades geológicas antigas (eras Paleozóica e Mesozóica). Com a evolução geológica, esses sedimentos sofreram processo de litificação, transformando-se em rochas compactas, e encontram-se hoje parcialmente expostos no continente, modelados na forma de colinas e morros. Possuem ampla distribuição no território nacional e apresentam bom desempenho cerâmico, sobretudo no processamento térmico, devido à presença de grande quantidade de óxido de potássio e de material ferruginoso, que auxilia no processo de sinterização e este último proporciona cores de queima avermelhadas. As rochas de interesse cerâmico nas bacias sedimentares são os folhelhos, argilitos, siltitos, ritmitos e outras rochas de natureza pelítica, que são denominadas no jargão cerâmico, “taguás” (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2005).

Assim, as argilas para cerâmica vermelha são partículas extremamente pequenas, composta de certas substâncias chamadas de argilominerais e englobam uma grande variedade de substâncias (caulinita, quartzo, sílica, alumina, óxido de ferro, álcalis, água, carvão e demais impurezas orgânicas), dentre as quais a caulinita é a mais abundante (LEGGERINI, 2004; COELHO, 2009).

A qualidade dos blocos cerâmicos está ligada principalmente às propriedades tecnológicas e mineralógicas da argila, tais como granulometria, plasticidade e

composição mineralógica, dentre outros vários fatores que podem ser apontados (MORAIS e SPOSTO, 2006).

- Granulometria

A composição granulométrica de massas cerâmicas vermelha, conforme descrita na Tabela 2, exerce papel fundamental no processamento e nas propriedades dos diversos tipos de produtos, visto que a dimensão, a distribuição e a forma do grão, irão influenciar diretamente na plasticidade das pastas, na permeabilidade e na resistência dos corpos cerâmicos (PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997; MEIRA, 2001).

**Tabela 2.** Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha.

Regiões	Tipos de produto	Composição granulométrica (%)		
		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

Fonte: Pracidelli e Melchiades (1997)

- Plasticidade

Plasticidade é a propriedade que um sistema rígido possui de deformar-se, sem romper-se, pela aplicação de uma força (tensão) e de reter essa deformação quando a força aplicada é retirada (CAMPO *et al.*, 1999).

As partículas coloidais têm grande atração, porém ao serem hidratadas ficam envolvidas por uma camada lubrificante que lhe conferem alta plasticidade, enfraquecendo essa atração. Além da água, algumas substâncias podem contribuir para o aumento da plasticidade, tais como: carbonatos, hidróxidos, silicatos e oxalatos (LEGGERINI, 2004).

Como também existem substâncias que contribuem para diminuir a plasticidades, conhecidas como substâncias desplastificante (ar incorporado, detergentes, sabões, pó de minerais, areia e pó de cerâmica). Estas substâncias são usadas como aditivo para correções na fabricação da cerâmica (LEGGERINI, 2004).

A plasticidade é ainda influencia pelo tamanho, formato e comportamento químico dos grãos.

Morais e Sposto (2006) afirmam que o ideal é que a maioria das massas cerâmicas para extrusão sejam constituídas por duas argilas, uma muito plástica (frequentemente ilítica ou montmorilonítica) e outra pouco plástica (normalmente muito silicosa). Isso irá garantir um fácil ajuste da plasticidade às condições de processamento, especificamente, a extrusão.

- Efeito do calor

Pinheiro e Holanda (2010) consideram a temperatura de queima como um importante parâmetro de processamento, que influencia fortemente as propriedades mecânicas, uma vez que é responsável pelo fechamento da porosidade aberta no interior das peças de cerâmica vermelha. A porosidade quando aberta se deve principalmente a desidroxilação da caulinita (formação da metacaulinita amorfa) e posterior transformação para fases cerâmicas de alta temperatura (formação da mullita).

Leggerini (2004) divide o processo de aquecimento em quatro fases:

- 1°. Temperatura de queima variando entre 20 e 150°C a argila perde água do amassamento e de capilaridade;
- 2°. De 150 a 600°C a argila perde a água de plasticidade, ou seja, endurece, mas continua sendo argila. Até este ponto não há alteração nas características químicas, pois se hidratada novamente, retorna às condições iniciais de plasticidade.
- 3°. A partir de 600°C, começam as alterações químicas. A água de constituição da molécula de argila é expulsa, inicia o endurecimento permanente, e a queima de materiais orgânicos existentes. Posteriormente, ocorre a oxidação, em que os carbonetos são calcinados e se transformam em óxidos.
- 4°. Por fim, de 950 a 1050°C, a peça de cerâmica vermelha apresenta uma superfície de fratura com textura mais suave e menos porosa. O volume de poros abertos diminuiu significativamente, ocorrendo o crescimento de pescoço interpartícula e a formação de uma fase líquida, principais responsáveis pela eliminação de grande quantidade de porosidade aberta no interior da peça de cerâmica vermelha. A fase líquida quando resfriada se transforma em filamentos finos de vidro que tende a preencher parcialmente os poros abertos na estrutura da peça cerâmica (PINHEIRO e HOLANDA, 2010).

Pinheiro e Holanda (2010) relatam ainda que até cerca de 950 °C ocorre fraca sinterização sólida das partículas associada à alta porosidade aberta, que tende a favorecer em termos de propriedades físico-mecânicas a produção de tijolos e blocos cerâmicos. E acima de 950 °C, a porosidade aberta pode se fechar de forma mais significativa, devido à presença de uma pequena quantidade de finos filamentos de vidro, que tende a favorecer a produção de telhas e tubos cerâmicos.

Cabral Junior *et al.* (2010) considera a sinterização na cerâmica vermelha, que corresponde ao processo de aglomeração de partículas por aquecimento, pouco desenvolvida, em função das baixas temperaturas de queima, formando uma fase vítrea incipiente que une as partículas minerais.

Enfim, a composição mineralógica, química e física das argilas é importante para a confecção de peças cerâmicas, pois, isoladamente ou combinada, essas propriedades conferem as características de trabalhabilidade no preparo e conformação das peças e a sinterização no processamento térmico, dando a resistência mecânica necessária. No caso específico de fabricação de telhas, as argilas devem apresentar plasticidade adequada para a moldagem, tensão de ruptura à flexão elevada quando secas, de forma a permitir o manuseio durante o processo de fabricação. Após a queima deve apresentar baixa porosidade aparente e baixa absorção de água e não apresentar trincas e empenamentos após secagem e queima, visto que a exigência técnica é mais rigorosa para telhas e blocos estruturais, requerendo assim maior sinterização das peças (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2010).

### 3.3.6. Telhas

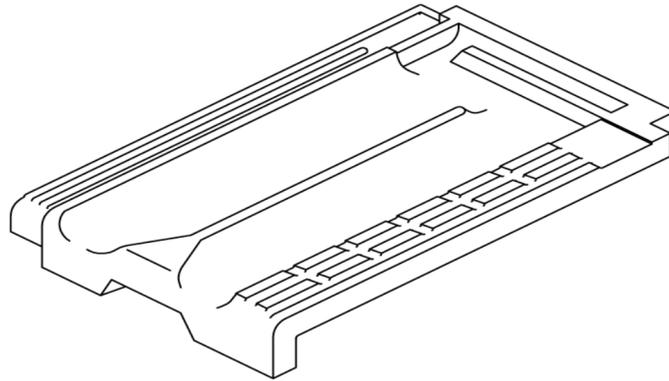
As telhas cerâmicas são componentes destinados à montagem de cobertura estanque à água, de aplicação descontínua, de acordo com a NBR 15310 (ABNT, 2005).

A dependência das telhas cerâmicas são caracterizadas conforme a matéria prima que compõe a massa, constituído na maior parte de argilas plásticas e não-plásticas. Sendo este atuante como agente desplastificante.

A NBR 15310 (ABNT, 2005) classifica as telhas como:

*Telhas planas de encaixe:* Telhas cerâmicas planas que se encaixam por meio de sulcos e saliências, apresentando pinos, ou pinos e furos de amarração, para fixação na estrutura de apoio (Figura 2).

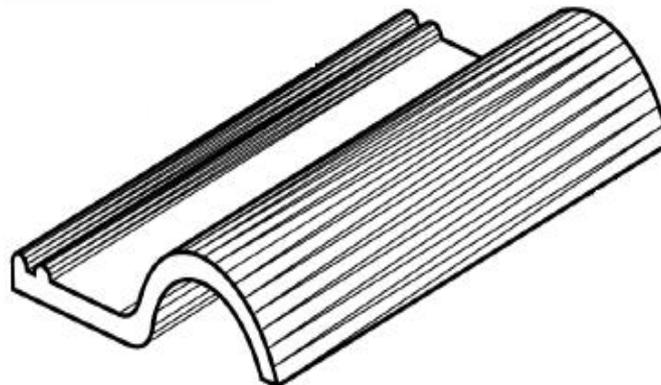
**Figura 2.** Exemplo esquemático do modelo de telha plana de encaixe.



Fonte: NBR 15310 (ABNT, 2005)

*Telhas compostas de encaixe:* Telhas cerâmicas planas que possuem geometria formada por capa e canal no mesmo componente (Figura 3) para permitir o encaixe das mesmas entre si, possuem pinos, ou pinos e furos de amarração, para fixação na estrutura de apoio.

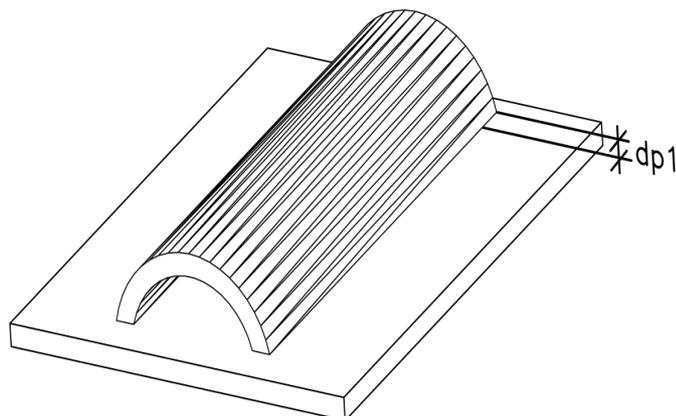
**Figura 3.** Exemplo esquemático do modelo de telha composta de encaixe.



Fonte: NBR 15310 (ABNT, 2005)

*Telhas simples de sobreposição:* Telhas cerâmicas formadas pelos componentes capa e canal independentes (Figura 4). A concavidade ou convexidade define a utilização como canal ou capa respectivamente. O canal deve apresentar pinos, furos ou pinos e furos de amarração, para fixação na estrutura de apoio; a capa esta dispensada de apresentar furos ou pinos. Sendo esta o foco desta pesquisa.

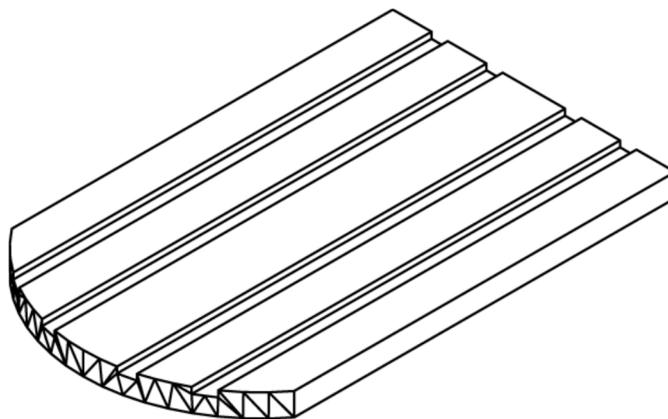
**Figura 4.** Exemplo esquemático do modelo de telha simples de sobreposição.



Fonte: NBR 15310 (ABNT, 2005)

*Telhas planas de sobreposição:* Telhas cerâmicas planas que somente se sobrepõem (Figura 5), e que podem ter pinos para o encaixe na estrutura de apoio ou pinos e furos de amarração para fixação.

**Figura 5.** Exemplo esquemático do modelo de telha plana de sobreposição.



Fonte: NBR 15310 (ABNT, 2005)

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Coleta dos materiais

Para o presente estudo foram utilizadas como matérias-primas massa cerâmica coletada na Cerâmica Santo Expedito em Porto Nacional – TO e o lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água – ETA 006 da Odebrecht Ambiental/Saneatins em Palmas-TO.

A Figura 6 apresenta uma vista panorâmica da Estação de Tratamento de Água 006 (ETA 006). Essa ETA é administrada pela Odebrecht Ambiental e está localizada na Rodovia TO-050, Km 12, zona sul da cidade de Palmas, Estado do Tocantins. Apresenta tratamento de ciclo convencional com capacidade de vazão média de 700 l/s e abastece cerca de 90% da população urbana de Palmas.

**Figura 6.** Vista panorâmica da ETA 006 em Palmas-TO.



Fonte: Acervo Saneatins/FOZ

Com base no Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas/TO (PALMAS, 2014), o tratamento da água para abastecimento público da região central e sul do município tem início na barragem do ribeirão Taquarussu Grande onde a captação é realizada superficialmente, seguida de bombeamento, caixa de chegada, calha Parshall, caixa de distribuição com dez vertedouros, um módulo de tratamento contendo: floculador com duas câmaras; dois decantadores convencionais com removedores de lodo do tipo horizontal; seis filtros rápidos, por gravidade, de taxa declinante variável, com dupla camada (areia e antracito); casa de química, utilizando no tratamento principalmente sulfato de alumínio, cal hidratada e ácido fluossilícico; e por fim, desinfecção e fluoretação.

A operação de descarga dos decantadores é contínua, com frequência de 8 horas. Todo o resíduo gerado (lodo) é encaminhado para o Sistema de Desaguamento que ocorre em três Bag's de geotêxtil horizontais, com volume de 440 m<sup>3</sup>, conforme Figura 7 (HIDROSAN ENGENHARIA, 2011).

**Figura 7.** Bags de geotêxtil horizontais, dispostos na ETA 006 em Palmas-TO.



Foram realizadas coletas do lodo em dois períodos do ano: abril/2015 (período chuvoso) e outubro/2015 (período de estiagem). Ao todo foram coletados cerca de 400 litros de lodo em estado líquido nestes dois períodos.

O lodo foi coletado dos Bag's com a utilização de um trado (Figura 8). O trado possuía um copo coletor com comprimento de 0,50 m, diâmetro de 0,10 m, com duas hastes de extensão, cada uma medindo 2 m. Para amostrar todo o material contido nos Bag's, foram realizadas coletas nas três camadas de cada bag: fundo, meio e superficial, realizando assim uma mistura homogênea da amostra.

**Figura 8.** Equipamento utilizado para coleta do lodo nos Bag's.



## **4.2. Secagem e Preparação dos materiais**

As matérias primas utilizadas no presente trabalho, massa cerâmica e lodo de ETA primeiramente passaram por processo de secagem, seguidas de destorroamento, homogeneização e peneiramento, conforme descrito na NBR 6457 (ABNT, 1986), que resultou em 400 kg de massa cerâmica, 40 kg de lodo seco no período estiagem e 58 kg de lodo seco no período chuvoso. Após este processo foram confeccionadas a mistura 90% de massa cerâmica + 10% de lodo de ETA para o período chuvoso e de estiagem. Em seguida, a massa cerâmica e as duas misturas foram caracterizadas: física, mineralógica e quimicamente.

## **4.3. Caracterização Física**

As análises foram realizadas no Laboratório de Solos do Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos – ITPAC em Porto Nacional.

Para a caracterização física das matérias-primas e misturas realizou-se ensaios de análise granulométrica, índices de consistência (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) e densidade real dos grãos, segundo as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

### *4.3.1. Análise Granulométrica*

Para determinar a distribuição de tamanho de partículas das amostras utilizou-se o método combinado de peneiramento e sedimentação, conforme NBR 7181 (ABNT, 1984). Com o material que foi passado na peneira de 2 mm (10 mesh).

Os ensaios de sedimentação consistiram em colocar em um béquer 70 gramas de amostra passante na peneira de 2 mm, seca ao ar, em 125 ml de solução de defloculante (hexametáfosfato) e deixar em repouso por um período de 24 horas.

A mistura foi colocada no dispersor por um período de 15 minutos. Logo após, a mistura foi colocada em uma proveta e adicionada água destilada até atingir o volume de 1000 ml. Após estabilizar a temperatura em 24°C agitou-se colocando as partículas em suspensão, e ao iniciar a sedimentação mergulhou-se cuidadosamente o densímetro na dispersão. Procedeu-se as leituras do densímetro nos tempos de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos.

Em seguida, lavou-se na peneira de 200 mesh, secou em estufa e só então procedeu-se o peneiramento utilizando para isto peneiras de 16, 30, 50, 100 e 200 mesh.

#### 4.3.2. Limites de Atterberg

A preparação da amostra para determinar estes limites seguiu o protocolo estabelecido na NBR 7180 (ABNT, 1984), em que foi tomada uma fração de 200g de cada matéria prima destorroadas, secas na temperatura ambiente e passantes na peneira de 40 mesh, e então umedecida com água, até formar uma pasta uniforme e consistente.

O limite de liquidez (LL) foi determinado conforme NBR 6459 (ABNT, 1984), utilizando o método de Casagrande. Os valores de umidade e números de golpes obtidos neste experimento foram plotados em um gráfico, em que na abscissa se encontrava o número de golpes e na ordenada, a respectiva umidade. A umidade referente à projeção de 25 golpes, sobre a reta traçada, foi considerada o limite de liquidez.

Para a determinação do limite de plasticidade (LP) seguiu-se a NBR 7180 (ABNT, 1984). Aproximadamente 10 g da amostra foi moldada até adquirir um formato cilíndrico. Quando o cilindro atingiu as dimensões previstas na norma e fragmentou determinou-se a umidade. Sendo a umidade média de 03 repetições considerada o limite de plasticidade.

O Índice de Plasticidade (IP), que indica o caráter plástico da matéria prima, foi obtido pela diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), conforme fórmula abaixo (Eq. 1).

$$IP = LL - LP \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

*IP = Índice de Plasticidade*

*LL = Limite de Liquidez*

*LP = Limite de Plasticidade*

Este índice determina o caráter de plasticidade da matéria prima, visto que, quanto maior o índice, mais plástico será o material.

#### 4.3.3. Massa Específica dos Grãos

A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1984), utilizando materiais passantes na peneira de 40 mesh. Para uma parte desta amostra foi determinada a umidade ( $M_1$ ) e a outra foi hidratada com água destilada por um período de 12 horas.

Em seguida, a amostra hidratada foi transferida ao picnômetro e aplicado vácuo de 88 KPa durante 15 minutos, a fim de remover todo o ar aderido às partículas do material. Adicionou-se água destilada até a marca de calibração do picnômetro, e deixou-o em repouso até alcançar a temperatura ambiente. Foi então pesado o picnômetro+ matéria-prima + água ( $M_2$ ) e anotou-se. Logo em seguida, foi determinada a curva de calibração correspondente a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência ( $M_3$ ).

Os dados obtidos foram aplicados na seguinte fórmula (Eq. 2):

$$\delta = \frac{M_1 \times 100 \div (100+h)}{[M_1 \times 100 \div (100+h)] + M_3 - M_2} \times \delta_T \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

$\delta$  = massa específica dos grãos do material, em  $\text{g/cm}^3$

$M_1$  = massa do material úmido

$M_2$  = massa do picnômetro+ matéria prima + água, na temperatura  $T$  de ensaio

$M_3$  = massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência.

$h$  = umidade inicial da amostra

$\delta_T$  = massa específica da água, na temperatura  $T$  de ensaio, obtida a partir de tabela de referência.

#### 4.4. Caracterização mineralógica

As análises foram realizadas no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do SENAI - Criciúma.

Para caracterização mineralógica foi realizada difração de raios-X (DRX), análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (ATD).

As análises de DRX foram realizadas em amostras em forma de pó da massa cerâmica, dos lodos e das misturas (90% solo+10% lodo) da estação seca e chuvosa. Para isso, foi utilizado o equipamento Difrátômetro Bruker - D8 com goniômetro theta, radiação  $K\alpha$  em tubo de cobre nas condições de 40 kV e 40 mA. Empregou-se 1g de pó com velocidade de  $0,02^\circ/\text{s}$ , e intervalo de  $2^\circ$  até  $72^\circ$  referentes ao  $2\theta$ .

A quantificação das fases cristalinas, minerais, identificadas nas misturas foram realizadas pelo Método de Rietveld com  $\text{GOF} = 1,08$  e  $\text{Rwp} = 8,57$ .

As análises de ATD/TG foram realizadas em temperatura ambiente (aproximadamente  $25^\circ\text{C}$ ) até  $1200^\circ\text{C}$ , com taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , nas mesmas amostras submetidas ao DRX. Para este estudo foi utilizado um analisador térmico simultâneo Netzsch STA 409EP.

#### 4.5. Caracterização química

A análise química total foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X utilizando um Espectrômetro de Raio- X Panalytical modelo Axios Max por dispersão de comprimento de onda (WDXRF). Tal procedimento foi realizado no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do SENAI – Criciúma - SC. Este estudo foi realizado na massa cerâmica, lodo da estação chuvosa e de estiagem, bem como nas misturas da massa cerâmica+lodo. Antes das análises os materiais com granulometria menor que 0,074 mm foram secos em estufa a temperatura de 150°C até massa constante. Trituradas com um rolo de ágata, homogeneizadas e quarteadas. A amostra quarteada foi moída em moinho anelar de carbetto de tungstênio para melhor homogeneização. Logo após foi confeccionada pastilha fundida, um disco de vidro da amostra com fundente. A pastilha foi levada ao equipamento de Fluorescência de Raios X, onde foi realizada a leitura dos elementos e calibrados no equipamento para obtenção das concentrações dos elementos na amostra.

##### 4.5.1. Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e Matéria Orgânica

Essas análises foram realizadas no Laboratório Agropecuário Zoofértil - Palmas. A Capacidade de Troca Catiônica e a Matéria Orgânica foram determinadas para os lodos de ETA nos diferentes períodos do ano, utilizando para isso metodologia descrita pela Embrapa (1997) e Donagema (2011).

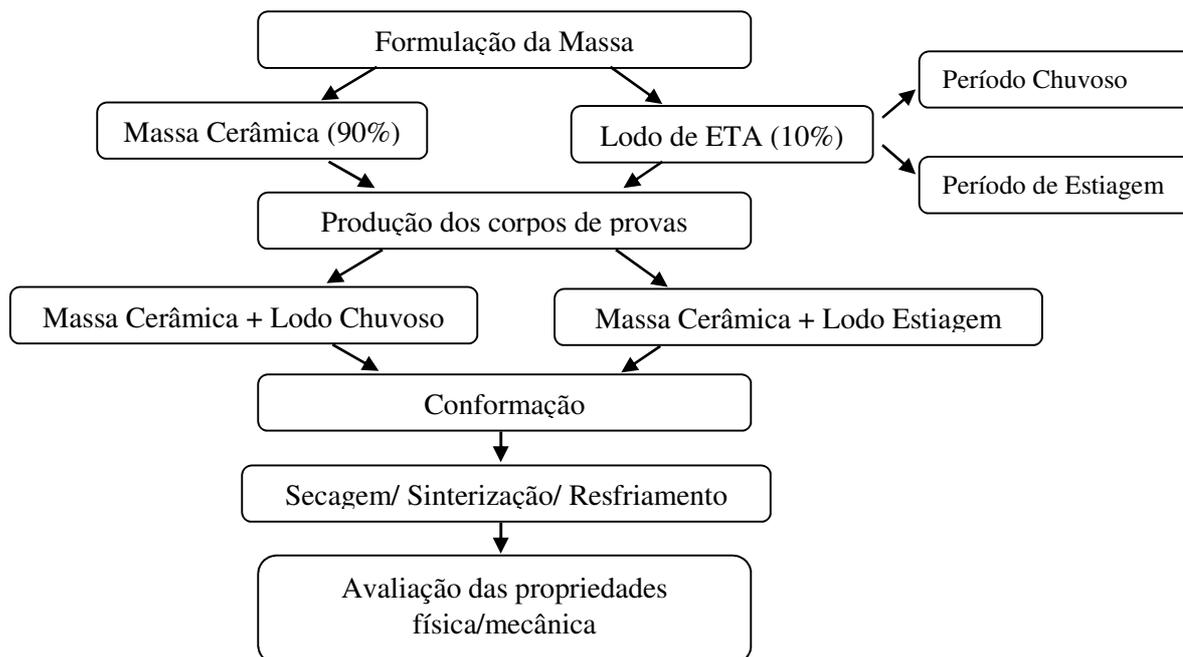
A CTC foi quantificada através da somatória das bases trocáveis (Cálcio -  $\text{Ca}^{2+}$  +  $\text{Mg}^{2+}$  +  $\text{K}^{+}$  +  $\text{Na}^{+}$ ) e da acidez potencial ( $\text{H}^{+}$  +  $\text{Al}^{3+}$ ), e o resultado apresentado em  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ .

O carbono orgânico foi determinado pelo método do dicromato e posteriormente a matéria orgânica foi calculada multiplicando o resultado do carbono orgânico por 1,724.

#### 4.6. Produção das Telhas

A Figura 9 apresenta o fluxograma em que estão descritas as fases metodológicas empregadas para incorporação de lodo de ETA na fabricação de telhas de cerâmica vermelha do tipo Plan.

**Figura 9.** Fluxograma das etapas empregadas para incorporação de lodo de ETA na fabricação de cerâmica vermelha.



#### 4.6.1. Formulação da Massa e produção das Telhas

O fluxograma acima mostra o processo das misturas da massa para produção dos corpos de provas. Em laboratório foram pesadas, homogeneizadas e ensacadas separadamente as amostras contendo 100% de massa cerâmica (branco) e outras contendo 90% de massa cerâmica e 10% de lodo de ETA tanto para os períodos chuvoso como de estiagem.

A cerâmica Santo Expedito não possui procedimento padrão de análise da matéria prima para fabricação das telhas, visto que isto requer tempo e custo. Assim, as misturas foram umedecidas até que a massa atingisse uma textura plástica adequada para conformação, tomando como base o conhecimento e senso comum do oleiro. A Figura 10 ilustra o equipamento utilizado para mistura da massa cerâmica.

Para conformação das telhas, o material passou por homogeneização e prensagem uniaxial simples de 25 MPa em um molde.

**Figura 10.** Equipamento utilizado para mistura da matéria prima na fabricação das telhas.



As telhas úmidas, conforme mostradas na Figura 11, foram dispostas em um conjunto de prateleiras e armazenadas à sombra, onde passou pelo processo de secagem durante 10 dias. Depois deste período, as telhas foram colocadas no forno do tipo intermitente caipira movido a lenha de podas. Esse tipo de forno possui a geometria circular, sendo fechado suas paredes. Durante o processo de sinterização o forno atinge cerca de 800°C no qual a telha foi queimada durante 24 horas. Após esse período, as telhas passaram por um resfriamento natural, lento no forno por 2 dias.

As telhas foram caracterizadas por meio de avaliação visual, determinação da absorção de água e carga de ruptura a flexão, conforme prevê a NBR 15310 (ABNT, 2005), no Laboratório da ITPAC em Porto Nacional – TO.

**Figura 11.** Telhas em processo de secagem.



## 4.7. Avaliação das Telhas

### 4.7.1. Avaliação visual

Para a avaliação do aspecto visual, conforme estabelece a NBR 15310 (ABNT, 2005), foi verificada a presença de esfoliação, risco, quebra, lascado e rebarba nas telhas produzidas.

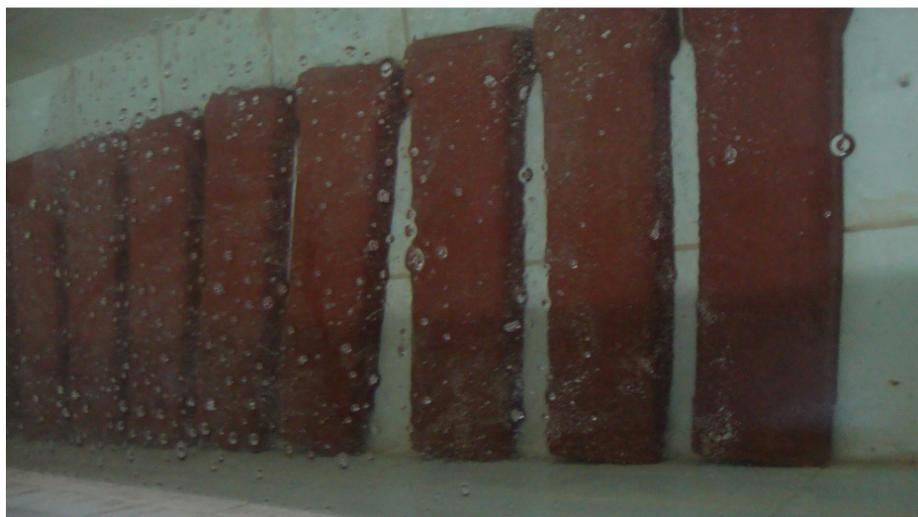
### 4.7.2. Absorção de água (AA)

Para determinação da absorção de água, primeiramente foram mensurados os valores de massa seca e massa úmida dos corpos de prova.

Com relação à massa seca, os corpos de provas foram submetidos à secagem em estufa à temperatura de 105°C até atingir peso constante.

Para determinação da massa úmida, os mesmos corpos de provas foram submetidos ao teste de imersão em um recipiente preenchido com água em temperatura ambiente, de maneira que o volume de água fosse suficiente para mantê-los totalmente imersos, por um período de 24 horas, conforme mostrado na Figura 12. Passado este período, os corpos de provas foram removidos do recipiente, colocados para escorrer, secos com pano e posteriormente pesados.

**Figura 12.** Telhas submersas na água, no Campus da ITPAC em Porto Nacional - TO.



A partir destes valores o índice de absorção de água (AA) foi determinado, utilizando para isto a seguinte equação (Eq. 3):

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

$AA(\%)$  = Índice de Absorção de Água expressa em porcentagem

$m_u$  = massa úmida de cada corpo de prova

$m_s$  = massa seca de cada corpo de prova

De acordo com a NBR 15310 (ABNT, 2005), o limite máximo admissível de absorção de água é 20 %.

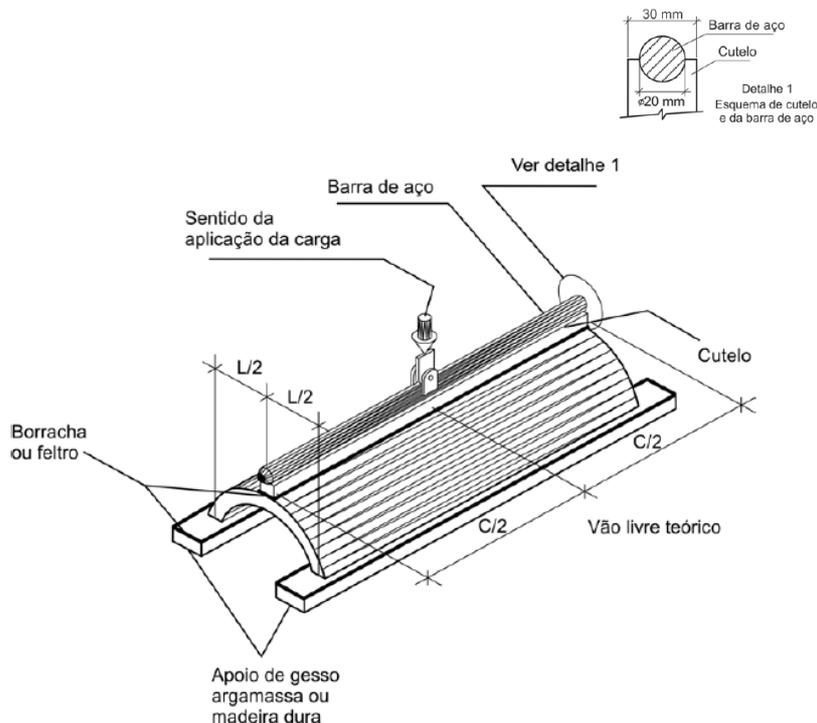
Para comparar a absorção de água entre os diferentes materiais (massa cerâmica e massa cerâmica + lodo de ETA) e período do ano (lodo período chuvoso e o lodo período estiagem), foi realizado Teste t e posteriormente aplicado o teste de Tukey com probabilidade de 5%, utilizando-se o programa estatístico BioEstat (AYRES *et al.*, 2003).

#### 4.7.3. Carga de ruptura à flexão simples (FR)

Após o teste de absorção de água, os mesmos corpos de provas foram submetidos a testes específicos para flexão de telha do tipo plan, conforme descrito na NBR 15310 (ABNT, 2005), para determinar a carga de ruptura à flexão.

O esquema mostrado na Figura 13 ilustra o dispositivo utilizado para aplicação de carga.

**Figura 13.** Dispositivo para aplicação de carga.



Fonte: NBR 15310 (ABNT, 2005).

Os corpos de provas foram encaixados no dispositivo, em seguida foi aplicada a carga no ponto correspondente à metade da largura da telha, a uma velocidade constante de 50 N/s, sem golpes, até que ocorresse a ruptura do mesmo. O valor de carga máxima de ruptura de cada telha foi então determinado em newtons.

A NBR 15310 (ABNT, 2005) determina que para telhas do tipo plan a carga de ruptura a flexão é de no mínimo 1000 N.

Para comparar a carga de ruptura entre os diferentes materiais (massa cerâmica e massa cerâmica + lodo de ETA) e período do ano (lodo período chuvoso e lodo de estiagem), foi realizado Teste t e posteriormente aplicado o teste de Tukey com probabilidade de 5%, utilizando-se o programa estatístico BioEstat (AYRES *et al.*, 2003).

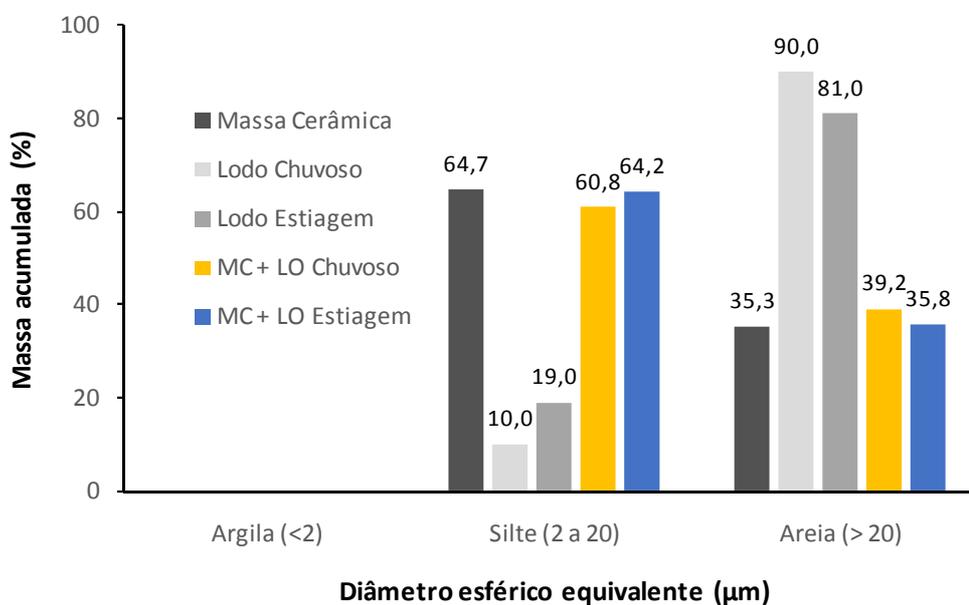
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização física das matérias-primas

#### 5.1.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica, conforme escala de classificação internacional (SANTOS, 1989), apresentou comportamento diferente para a massa cerâmica, os lodos dos períodos chuvoso e de estiagem, e para as misturas (90% de massa cerâmica + 10% de lodo dos períodos chuvoso e de estiagem), conforme Figura 14.

**Figura 14.** Composição granulométrica das matérias primas.



A massa cerâmica apresentou predominância em sua constituição de silte (64,7%) e de areia (35,3%), sendo enquadradas também como argila magra segundo Pracidelli e Melchhiades (1997). Já os lodos de ETA dos períodos chuvoso e de estiagem apresentaram composições semelhantes, sendo constituídos predominantemente de areia (grão com diâmetros superior a 20µm), 90 e 81%, respectivamente, seguido de silte 10% e 19%.

Quando verificada a composição na mistura de 90% de massa cerâmica com 10% de lodo de ETA, para ambos os períodos houve uma predominância de silte (60,8% para o período chuvoso e 64,2% para o período de estiagem), seguido de areia (39,2% período chuvoso e 35,8% na estiagem), respectivamente.

Alexandre (2000) e Chrispim *et al.* (2010) também verificaram predominância de silte na composição de 50% das massas cerâmicas utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha.

Com relação ao lodo estudado independente da estação, os resultados são semelhantes aos descritos por Camargo (2014) na análise granulométrica do lodo da ETA de Volta Redonda – RJ, com predomínio de areia (65%). De acordo com Pracidelli e Melchiades (1997) a areia é considerada um desplastificante que vem a acrescentar na trabalhabilidade de argilas muito finas, já que reduzem o grau de compactação da massa e as tensões desenvolvidas durante o processo de extrusão, e facilita a passagem de água do interior até a superfície da peça.

### 5.1.2. Limites de Atterberg

Para o processamento cerâmico, a plasticidade das argilas pode ser avaliada por meio dos limites de Atterberg (limite de consistência), que indicam a adequação da massa cerâmica a ser conformada por extrusão (ARAÚJO *et al.*, 2015). A Tabela 3 mostra os limites de Atterberg obtidos.

**Tabela 3.** Valores dos Limites de Atterberg para cada matéria primas e mistura.

PARÂMETROS	Massa Cerâmica (MC)	Lodo (LO) Chuvoso	Lodo (LO) Estiagem	MC + LO Chuvoso	MC + LO Estiagem
<b>Limite de Liquidez (LL)</b>	46%	0%	29%	45%	53%
<b>Limite de Plasticidade (LP)</b>	38%	0%	23%	38%	43%
<b>Índice de Plasticidade (IP)</b>	8%	0%	6%	7%	10%

Verificou-se que o limite de liquidez variou bastante nos materiais estudados. A massa cerâmica apresentou LL de 46%, o lodo do período chuvoso apresentou 0% e o lodo do período de estiagem apresentou 29%. Para as misturas variou de 45 a 53%. O limite de liquidez baixo do lodo nas duas estações corrobora a característica arenosa deste resíduo.

Oliveira *et al.* (2004) citaram que a plasticidade é de grande importância em cerâmica vermelha, já que é a extrusão se perfaz no principal método de conformação empregado, e para isso é preciso que a massa apresente uma consistência plástica. O Limite de Plasticidade (LP) indica a quantidade de água mínima que a massa cerâmica

deve conter para ser conformada (ARAÚJO *et al.*, 2015). Para o presente trabalho a umidade utilizada para conformação foi de 25%.

Esses resultados soam de forma negativa, uma vez que elevados valores de limite de plasticidade podem dificultar o processo de secagem, resultando em alta retração e defeitos nos corpos cerâmicos. Tal como o limite de liquidez, o limite de plasticidade da massa cerâmica se elevou com a adição do lodo da estação seca e se manteve estável para a adição do lodo da estação chuvosa. Oliveira *et al.* (2004) e Tartari (2008) também verificaram, para mistura com lodo, valores de LP acima da faixa recomendada para cerâmica vermelha, podendo estar relacionado à alta fração de matéria orgânica presente no resíduo.

Já o Índice de Plasticidade que é a diferença entre os dois limites acima mencionados, indica a faixa de valores em que o solo se apresenta plástico. Donde (2003) estabelece que a variação ideal de Índice de Plasticidade para fabricação de produtos cerâmicos se estende de 15 a 25%, no entanto, é aceitável uma variação de 10 a 35%.

Para as matérias primas em estudo, somente a mistura com 10% de lodo do período seco apresentaram valores de Índice de Plasticidade compatível com o valor mínimo estabelecido como aceitável.

Quanto menor o IP menor a faixa de trabalhabilidade do material. Tartari *et al.* (2011a) analisaram as características do lodo gerado na ETA de Tamandú verificaram que o lodo continha grande porcentagem de grãos de tamanho grosseiro, apresentando características desplastificante. Esta situação é semelhante à observada no presente trabalho para os períodos chuvosos e de estiagem quando o lodo foi constituído em 90% grãos com diâmetro superior a 20  $\mu\text{m}$  e IP igual a 0 na estação chuvosa, e IP igual a 6 na estação de estiagem.

A massa cerâmica testada apresenta LP acima e IP abaixo do recomendado por Donde (2003) para uma massa cerâmica utilizada na fabricação de telha. A adição do lodo da estação chuvosa na mistura baixou o limite de liquidez em 1%, manteve o limite de plasticidade e conseqüentemente elevou o IP em 1%, mas pode-se afirmar, com relação a estes limites, que esta adição não agregou diferença significativa a massa cerâmica. Já com a adição do lodo de estiagem ocorreu uma efetiva modificação com elevação de 7% no LL, 5% no LP e 3% no IP quando comparada com a massa inicial. A adição de lodo na massa cerâmica aumentou a retenção de água no sistema tornando a pasta plástica, contudo a faixa de trabalhabilidade dada pelo IP continuou baixo. Isto ocorre

provavelmente pela presença de silte e ausência de argila na massa cerâmica e no lodo de estiagem.

### 5.1.3. Massa Específica dos Grãos

A Tabela 4 determina os valores de massa específica dos grãos para as matérias primas e as mistura.

**Tabela 4.** Valores de Massa Específica dos Grãos.

PARÂMETROS	Massa Cerâmica (MC)	Lodo (LO) Chuvoso	Lodo (LO) Estiagem	MC + LO Chuvoso	MC + LO Estiagem
Massa Específica dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,85	2,60	2,57	2,84	2,85

Com base na tabela acima pode-se observar que a massa específica dos grãos da massa cerâmica apresentou valor de 2,85g/cm<sup>3</sup>, enquanto o lodo do período chuvoso foi de 2,60 g/cm<sup>3</sup>e do período de estiagem de 2,57 g/cm<sup>3</sup>. A adição do lodo de ambos os períodos do ano na mistura não alterou a densidade inicial da massa cerâmica.

Esta menor densidade apresentada pelo lodo possivelmente está relacionada à natureza da mineralogia e da presença de matéria orgânica. Segundo Santos (1989) matérias-primas que apresentam valores de 2,5 a 2,8 g/cm<sup>3</sup> são considerados dentro da faixa para produtos argilosos.

## 5.2. Caracterização mineralógica

### 5.2.1. Difractometria de raios X

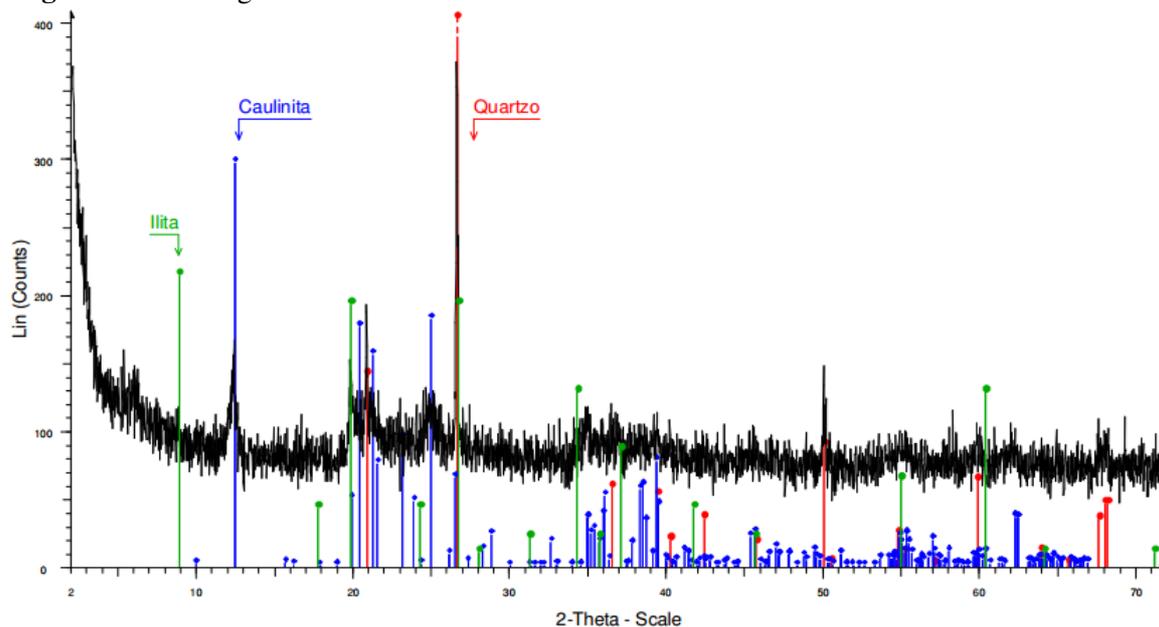
A Tabela 5 apresenta a quantificação das fases cristalinas das matérias-primas analisadas.

**Tabela 5.** Quantificação das fases cristalinas das matérias-primas.

Fase identificada	Massa cerâmica	Lodo Chuvoso	Lodo de Estiagem	Mistura 10% Lodo Chuvoso	Mistura 10% Lodo de Estiagem
Caulinita	64,1%	76,7%	86,6%	70,7%	76,8%
Ilita	20,5%	0%	0%	0%	0%
Quartzo	15,4%	13,1%	7,6%	25,9%	22,1%
Hematita	0%	10,2%	5,8%	3,4%	1,1%

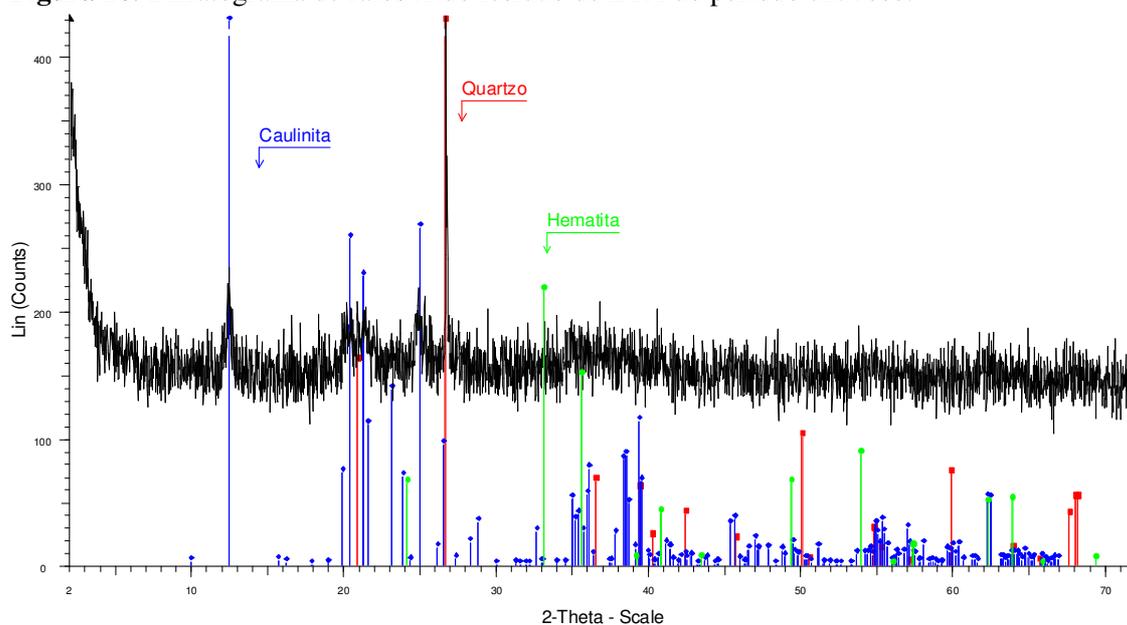
A quantificação das fases cristalinas identificadas a partir de Difração de Raio X da massa cerâmica apresentou picos de difração predominante de caulinita (mineral filissicado do grupo da caulinita), ilita (mineral filossilicato do grupo das hidromicas) e quartzo (mineral de óxido de silício), conforme Tabela 5 e Figura15.

**Figura 15.** Difratoograma de raios X da massa cerâmica.

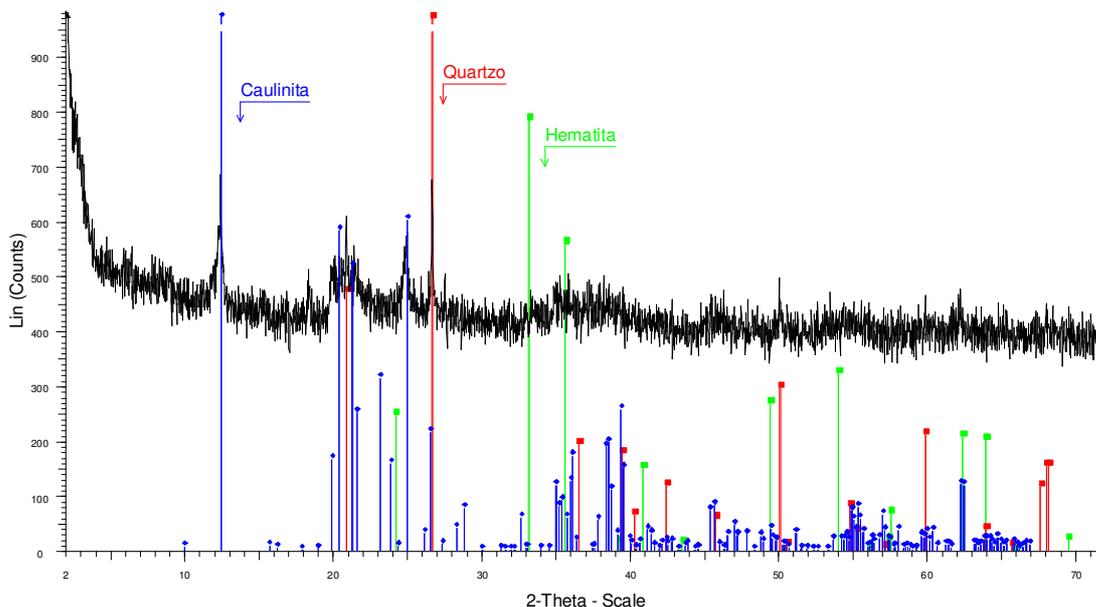


Já os lodos da ETA 006, tanto no período chuvoso quanto no período de estiagem, apresentaram picos de difração predominante de caulinita, quartzo e hematita (mineral de óxido de ferro), conforme Tabela 5 e Figuras 16 e 17.

**Figura 16.** Difratoograma de raios X do resíduo de ETA do período chuvoso.



**Figura 17.** Difratoograma de raios X do resíduo de ETA do período de estiagem.



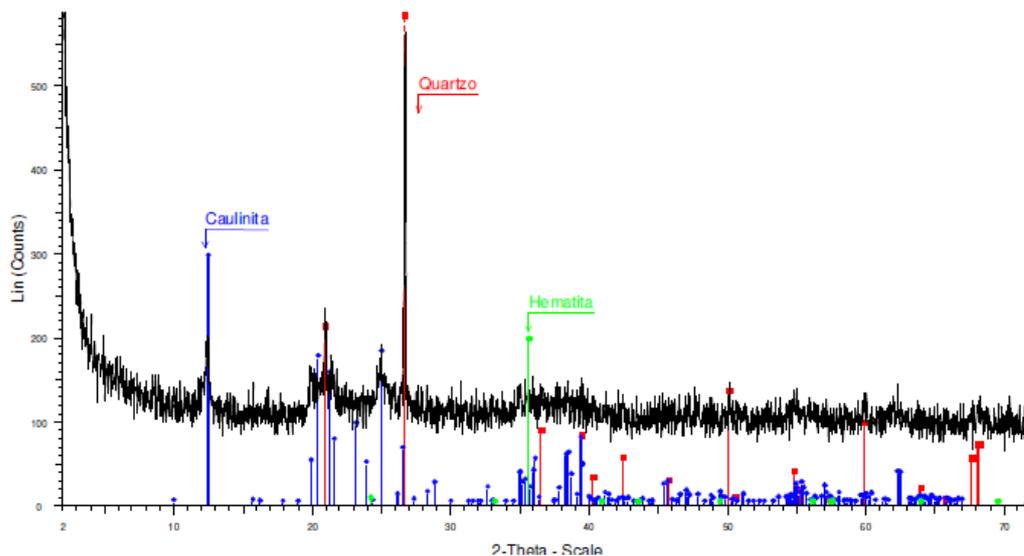
A baixa densidade do lodo está associada a predominância de minerais de baixa densidade e provavelmente a presença de matéria orgânica quando comparado com a massa cerâmica. Isso porque a caulinita apresenta densidade variando entre 2,61 e 2,66  $\text{g/cm}^3$  e esteve presente em maior percentual no lodo. Mesmo com a presença da hematita no lodo, que apresenta uma densidade relativamente alta, variando entre 4,90 e 5,30  $\text{g/cm}^3$ , não foi suficiente para elevar a densidade da mistura de massa cerâmica e lodo.

Já a ilita encontrada na massa cerâmica é um argilomineral presente na fração silte e argila com densidade máxima de 2,86  $\text{g/cm}^3$ . O seu percentual pode ter elevado a densidade da massa cerâmica e sua plasticidade.

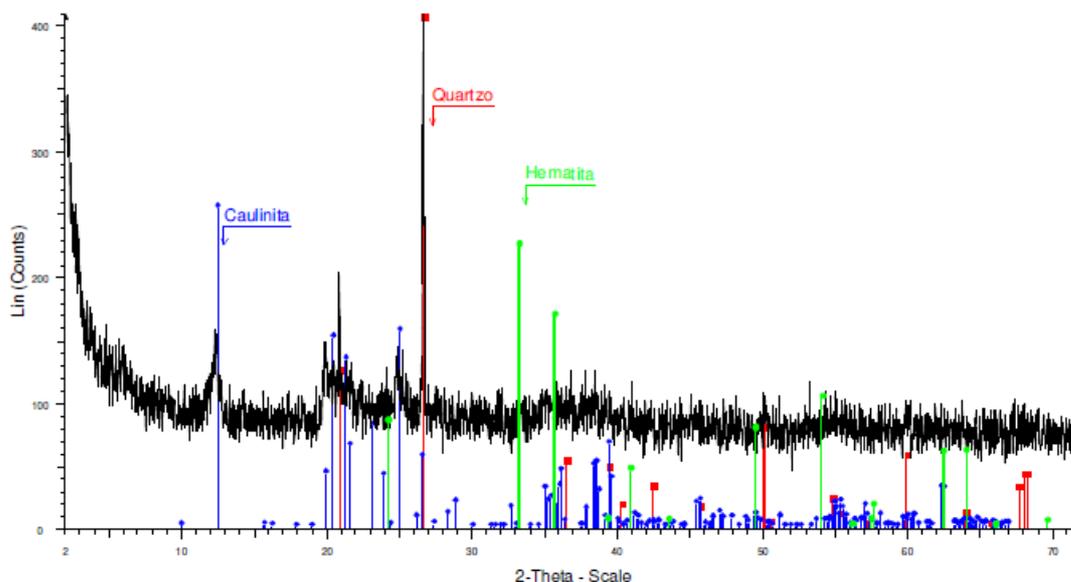
Ainda com relação à ilita, provavelmente é ela quem confere o limite de plasticidades e de liquidez elevado, fora dos padrões da massa cerâmica, no entanto, a presença da caulinita e do quartzo reduz estes limites contrabalanceando o comportamento da ilita.

Foram verificados para as misturas 90% massa cerâmica com 10% de lodo do período chuvoso e do período de estiagem, conforme mostrado nas Tabela 5 e Figuras 18 e 19. Em ambas as situações caulinita foi o mineral com maior predominância, seguida de quartzo e hematita.

**Figura 18.** Difratoograma de raios X da mistura 90% massa cerâmica + 10% lodo do período chuvoso.



**Figura 19.** Difratoograma de raios X da mistura 90% massa cerâmica + 10% lodo do período de estiagem.



Resultados semelhantes ao presente estudo foram encontrados por Tartari *et al.* (2011a) na caracterização mineralógica do lodo gerado na ETA Tamanduá, em que também foi verificada a predominância destas três fases citadas para os lodos nos diferentes períodos do ano.

A caulinita é o mineral predominante na maioria dos trabalhos relacionados a caracterização de lodo de ETA, conforme verificado por Santos *et al.* (2000), Oliveira *et al.* (2004), Monteiro *et al.* (2008), Tartari (2008), Margem (2008), Muller (2009), Silva e

Fungaro (2011), Camargo (2014), Soares *et al.* (2014). De acordo com Tartari (2008) esse mineral é um dos principais componentes da argila.

### 5.2.2. Análise termogravimétrica

A Tabela 6 apresenta o comportamento térmico (ATD/TG) da massa cerâmica, dos lodos da ETA e das misturas nos períodos chuvoso e de estiagem.

**Tabela 6.** Comportamento térmico (ATD/TG) das matérias primas.

MATÉRIA PRIMA		EVENTO			
		Saída de Água Adsorvida	Desidroxilação de hidróxido e decomposição de matéria orgânica Pico Exotérmico	Desidroxilação da caulinita Pico Endotérmico	Formação de espinélios mulita Pico Exotérmico
Massa Cerâmica	Temp. °C	112,8	180 – 340	518	925
	Perda de Massa (%)	1,82	1,86	7,63	-
Lodo Chuvoso	Temp. °C	111	322	515	915
	Perda de Massa (%)	3,84	12,79	5,6	-
Lodo Estiagem	Temp. °C	109	321	515	909
	Perda de Massa (%)	2,37	13,19	5,58	-
MC + Lodo Chuvoso	Temp. °C	111,6	181 - 395	516,7	920,9
	Perda de Massa (%)	1,44	3,64	6,85	-
MC + Lodo Estiagem	Temp. °C	110,2	178	516,7	921
	Perda de Massa (%)	1,72	3,13	7,4	-

Foram observados quatro eventos térmicos para todas as matérias primas analisadas, conforme apresentado nas Figuras 20 a 24.

No primeiro evento a temperatura variou de 109° a 112,8°C, com perda de massa entre 1,44 e 3,84% relativa à saída de água adsorvida. A maior perda de massa observada neste evento foi para o lodo do período chuvoso (3,84%).

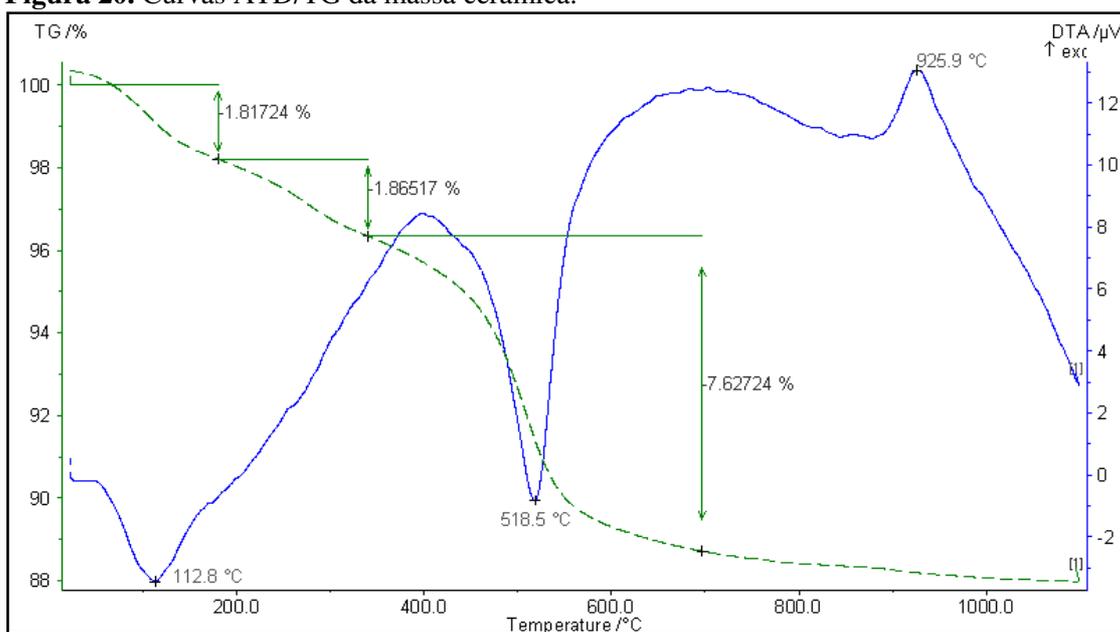
No segundo evento ocorreu com temperatura entre 178° e 395° relativo a picos exotérmicos. A perda de massa variou de 1,86 a 13,19%. Perdas acentuadas foram observadas para os lodos dos períodos chuvoso e de estiagem, 12,79 e 13,19%, respectivamente a temperaturas acima de 320°. Esta perda possivelmente está relacionada a desidroxilação de algum hidróxido e/ou a decomposição de matéria orgânica.

No terceiro evento ocorreu, com picos endotérmicos, em temperaturas variando de 515° a 518°. A perda de massa foi entre 5,6 e 7,63%. Maior perda de massa foi observada para a massa cerâmica. Essa perda provavelmente está relacionada à desidroxilação da caulinita.

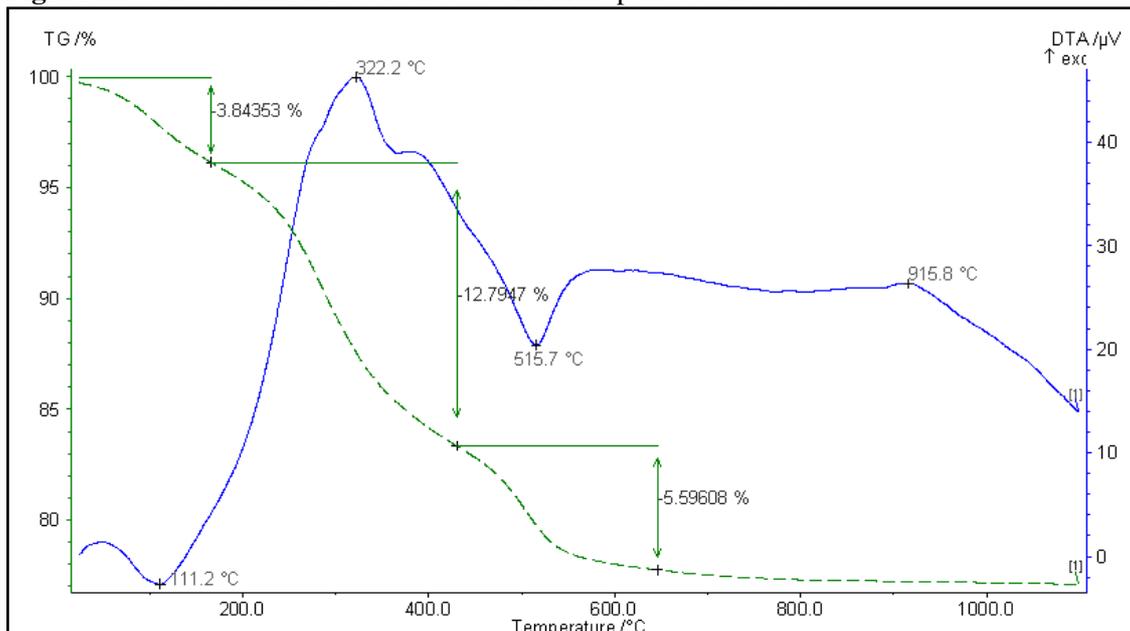
O quarto e último pico observado foi exotérmico, a uma temperatura variando de 909° a 925°C. A perda de massa foi constante e próxima a zero para todas as matérias primas. Este pico é relativo à formação de espinélios que geram a mulita.

A perda de massa total variou de 11,31 a 22,23%, apresentando maior valor para os lodos dos períodos chuvoso e de estiagem até 515°C. Monteiro *et al.* (2008) para o lodo de ETA de Campos de Goytacazes, obteve perda em torno de 17,70% à temperatura de 313,3°C. Esta perda foi relacionada à oxidação da matéria orgânica. Oliveira *et al.* (2004) também obteve perda de massa em torno de 22,2%, similar ao verificado no presente trabalho.

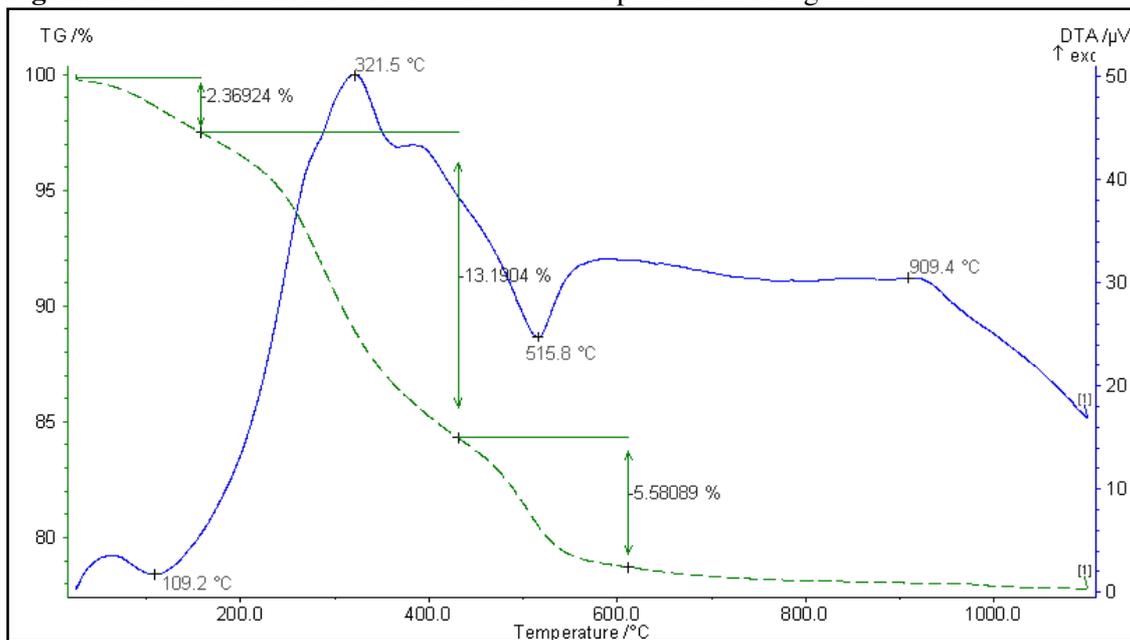
**Figura 20.** Curvas ATD/TG da massa cerâmica.



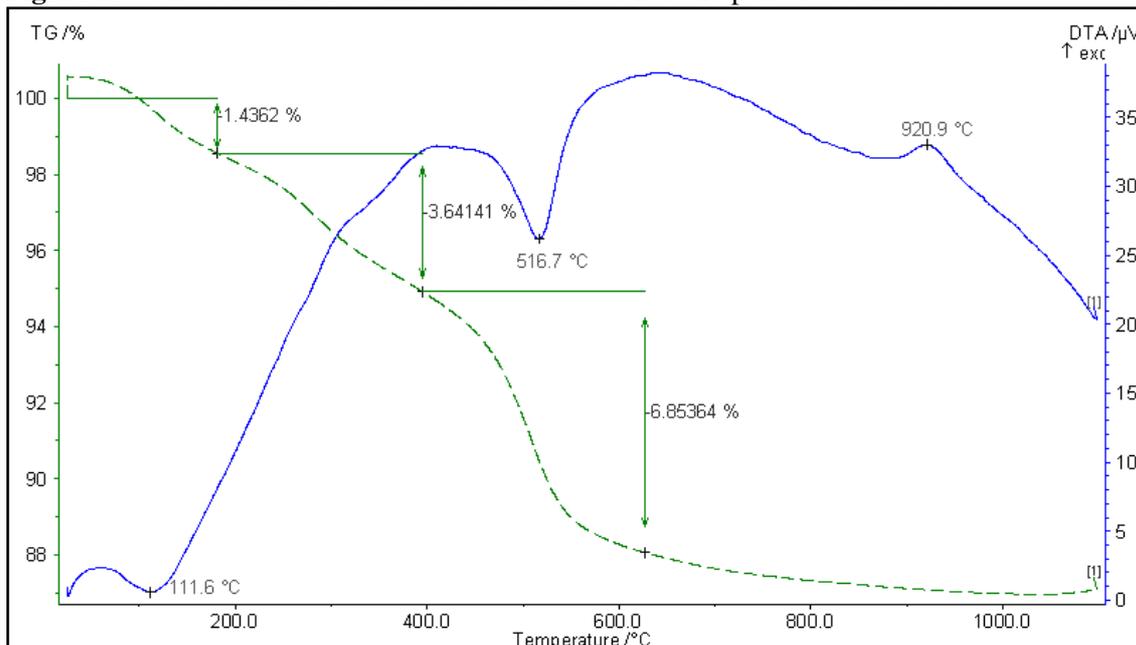
**Figura 21.** Curvas ATD/TG do resíduo de ETA no período chuvoso.



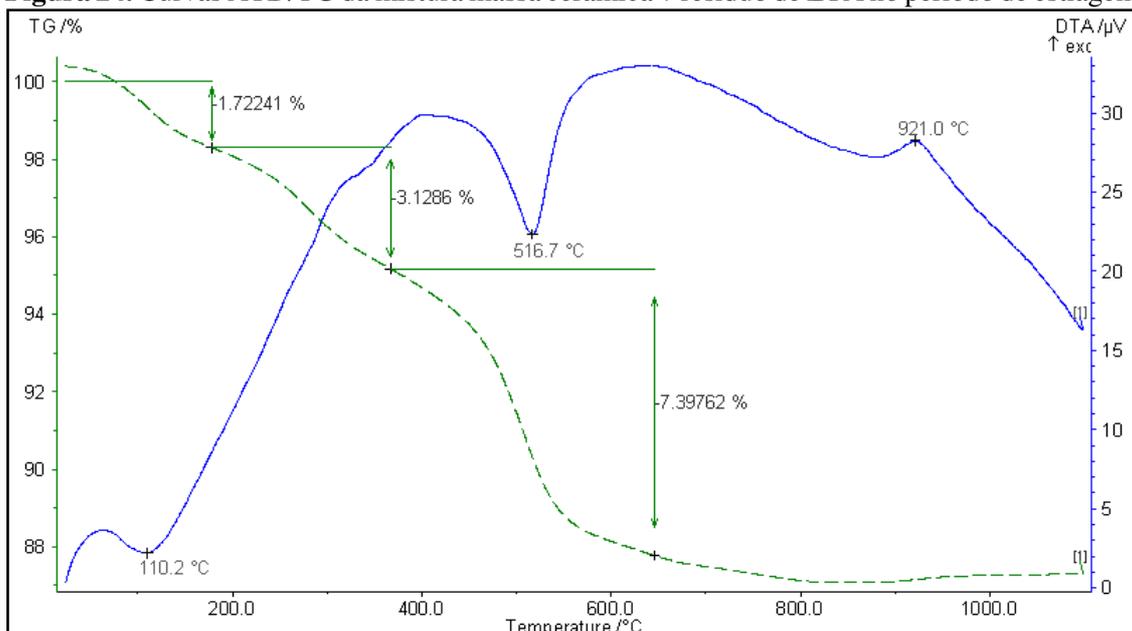
**Figura 22.** Curvas ATD/TG do resíduo de ETA no período de estiagem.



**Figura 23.** Curvas ATD/TG da mistura com 10% de lodo no período de chuvoso.



**Figura 24.** Curvas ATD/TG da mistura massa cerâmica + resíduo de ETA no período de estiagem.



Por meio destas análises é possível observar que a massa cerâmica perde mais massa a uma temperatura mais alta, aproximadamente 340°C, enquanto os lodos têm uma perda de massa maior a uma temperatura mais baixa, em torno de 322°C.

Já com a adição do lodo à massa cerâmica, houve elevação da perda de massa até o segundo pico, e elevação da temperatura. Possivelmente, essa maior perda de massa no lodo ocorre em virtude da decomposição da matéria orgânica, ou ainda pode estar relacionada aos produtos presentes no lodo em função do processo de tratamento, como

é o caso do sulfato de alumínio que é utilizado como floculante no tratamento. O óxido de alumínio que é um dos compostos constituintes do sulfato de alumínio foi o segundo elemento químico mais abundante nos lodos, conforme mostrado na Tabela 7.

Lembrando que para fabricação de telhas, a perda de massa é em torno de 9% a uma temperatura máxima de 1050° (ANDRADE, 2009). No caso dos materiais estudados, todos apresentaram valor superior ao descrito, estando a mistura de massa cerâmica mais próxima dos limites para as telhas.

### 5.3. Caracterização química

A Tabela 7 apresenta a composição química das matérias primas analisadas.

**Tabela 7.** Composição química, em porcentagem, das matérias primas em estudo.

Elementos	Massa Cerâmica	Lodo Chuvoso	Lodo Estiagem	MC + Lodo Chuvoso	MC + Lodo Estiagem
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,24	26,4	24,63	23,67	23,73
CaO	0,2	0,88	1,12	0,23	0,26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,57	15,90	16,61	10,62	10,88
K <sub>2</sub> O	1,20	1,03	1,18	1,12	1,11
MgO	0,64	0,28	0,23	0,53	0,53
MnO	0,14	0,09	0,08	0,15	0,15
Na <sub>2</sub> O	0,19	0,16	0,28	0,13	0,13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13	0,25	0,27	0,39	0,40
SiO <sub>2</sub>	52,02	34,90	34,71	50,14	49,93
TiO <sub>2</sub>	1,10	0,75	0,91	1,10	1,10
Perda ao Fogo	10,56	19,3	19,75	11,46	11,58

As matérias primas (massa cerâmica, lodo da ETA 006 do período chuvoso e do período de estiagem, e misturas 90% de massa cerâmica + 10% de lodo de ETA do período chuvoso e do período de estiagem) apresentaram composição química com a mesma tendência, sendo compostas predominantemente de SiO<sub>2</sub> (sílica), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de ferro), correspondendo a mais de 75% do total do teor químico em todas as amostras.

Resultados semelhantes foram verificados por diversos autores que caracterizaram resíduos gerados em ETAs, tais como: Oliveira *et al.* (2004), Oliveira e Holanda (2008), Couto (2011), Tartari *et al.* (2011a), Silva (2011) e Camargo (2014).

Vitorino *et al.* (2009) caracterizando os resíduos provenientes das etapas de desarenação, decantação e de filtração de uma estação de tratamento de água – ETA

verificou resultados similares ao do presente trabalho para o lodo gerado a partir dos processos de decantação e filtração, sendo que a maior quantidade de  $\text{SiO}_2$  se deve a maior presença de areia fina.

Enquanto que Paixão *et al.* (2008) encontraram alto teor de ferro na composição química no lodo de ETA analisado, que possivelmente pode ser decorrente do uso de cloreto de ferro como coagulante na fase de tratamento de água. Eles verificaram ainda que a adição do lodo com alto teor de ferro causou efeitos deletérios em diversas características físicas e mecânicas da massa cerâmica, por meio da diminuição da resistência à flexão do corpo seco e do corpo sinterizado, aumento da absorção de água e da porosidade aparente, e formação de microtrincas ao redor das partículas.

A perda ao fogo da massa cerâmica foi de 10,56%, enquanto do lodo foi de 19,30% no período chuvoso e 19,75% no período de estiagem, e de 11,46% para a mistura 90% de massa cerâmica + 10% de lodo de ETA do período chuvoso e de 11,58% para a mistura do período de estiagem, conforme Tabela 7. Oliveira *et al.* (2004) obtiveram para o lodo de ETA de Campos dos Goytacazes 17% de perda ao fogo e consideraram este valor relativamente alto. Altos valores de perda a fogo podem estar relacionados à presença de argilominerais, hidróxidos e decomposição de matéria orgânica (OLIVEIRA *et al.*, 2004; OLIVEIRA e HOLANDA, 2008; VITORINO *et al.*, 2009).

O lodo tem menos silício e mais alumínio, ferro e perda ao fogo que a massa cerâmica e mistura, os demais elementos apresentam percentuais semelhantes. Este comportamento visto na análise química total confirma a mineralogia onde a massa cerâmica tem mais quartzo e ilita que são minerais com maior teor de  $\text{SiO}_2$  e menor  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que a caulinita e quartzo presentes no lodo. O maior teor de ferro do lodo é confirmado pela presença da hematita e os valores de perda ao fogo podem ser associadas à presença de matéria orgânica, dos sulfatos presentes no tratamento e desidroxilação dos minerais.

### 5.3.1. Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e Matéria Orgânica

A Tabela 8 apresenta os valores de Capacidade de Troca de Cátions - CTC e Matéria Orgânica presentes no lodo dos dois períodos amostrais.

**Tabela 8.** Valores de CTC e Matéria Orgânica para os lodos.

Período	CTC (cmol/kg)	Matéria Orgânica (g/kg)	Matéria Orgânica (%)
Lodo Chuvoso	17,10	63,00	6,30
Lodo Estiagem	16,03	43,00	4,30

Os valores de CTC (bases e acidez trocável) observados, independente do período do ano foram altos, o que provavelmente esteja relacionado à presença de matéria orgânica no lodo, pois a caulinita apresenta menor CTC e os demais minerais presentes no lodo não tem CTC.

Oliveira *et al.* (2004) obtiveram valor CTC para resíduo de ETA de 9,85 cmol<sub>c</sub>/kg. Provavelmente este valor dentro da variação de CTC da caulinita (3-15cmol<sub>c</sub>/kg) foi influenciada pelo baixo valor de matéria orgânica (0,95%) observada por estes autores no resíduo.

#### 5.4. Produção de Telhas

Na Cerâmica Santo Expedito em Porto Nacional foram produzidas 240 telhas do tipo Plan, conforme Tabela 9.

**Tabela 9.** Telhas produzidas.

TELHAS	NÚMERO
Massa cerâmica (chuvoso)	60
Massa cerâmica (estiagem)	60
90 % massa cerâmica + 10% lodo chuvoso	60
90 % massa cerâmica + 10% lodo estiagem	60
<b>TOTAL</b>	<b>240</b>

##### 5.4.1. Aspectos visuais

A Figura 25 apresenta as telhas produzidas somente com massa cerâmica. Apesar da grande quantidade de silte na composição, de modo geral, as telhas apresentaram características visuais sem a ocorrência de esfoliações, quebras, lascados e rebarbas, conforme prevê a NRB 15310 (ABNT, 2005).

**Figura 25.** Telha com 0% de lodo.



A Figura 26 apresenta as telhas produzidas com 10% de lodo de ETA no período chuvoso e de estiagem e alguns aspectos observados conforme NBR 15310 (ABNT, 2005)

**Figura 26.** Telha com 10% lodo dos períodos chuvoso e de estiagem.



a) Telha com mancha e esfoliação



b) Telha com fissura



c) Telha com esfoliações



d) Telha com risco



e) Telha com trincas e lascas

As telhas produzidas com lodo apresentaram frequentemente defeitos visuais, como laterais com lascados, riscos, esfoliações.

De acordo com Andrade (2009) as telhas devem apresentar características que são indispensáveis para sua aplicação em cobertura, tais como: superfícies lisas para facilitar o escoamento das águas, inexistência de fissuras, esfoliações, quebras, rebarbas ou qualquer defeito que prejudique o perfeito encaixe entre as mesmas.

A adição do lodo possivelmente acarretou maiores defeitos visuais em função da maior perda de massa, sobretudo com a queima da matéria orgânica, presente no resíduo e com a desidroxilação de hidróxidos.

#### 5.4.2. Absorção de Água

A Tabela 10 apresenta os valores médios de absorção de água determinados para os corpos de prova em análise.

**Tabela 10.** Valores médios de massa seca, massa úmida e absorção de água para as telhas produzidas em diferentes condições. (MC = massa cerâmica, LO = lodo de ETA).

Matéria-Prima	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	AA (%)
MC (chuvoso)	1483,16	1746,86	18
MC + LO (chuvoso)	1395,98	1684,17	21
MC (estiagem)	1370,98	1638,07	19
MC + LO (estiagem)	1347,32	1646,75	22

Com base nos resultados a seguir, verifica-se que as telhas produzidas utilizando como matéria-prima somente a massa cerâmica apresentaram valores de Absorção de Água inferiores a 20%, que é o valor máximo admissível para telhas em ambientes tropicais, conforme previsto na NBR 15310 (ABNT, 2005).

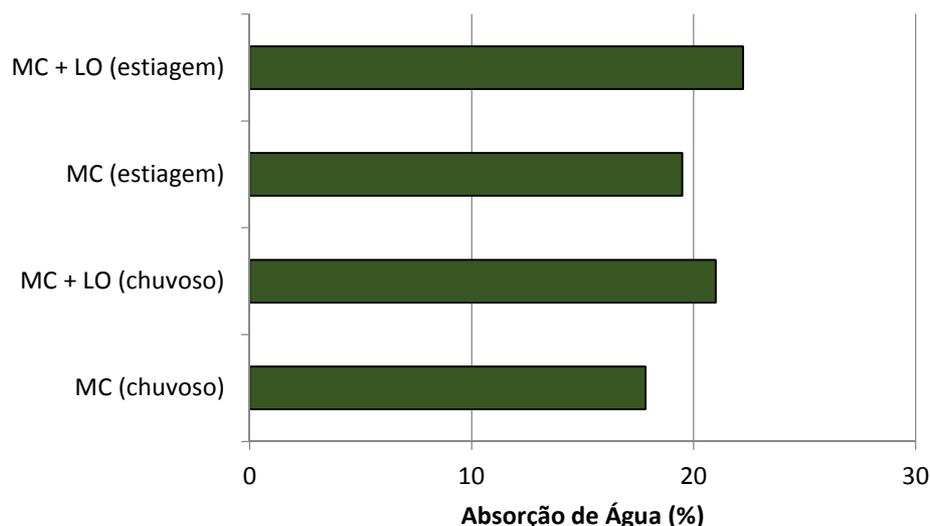
Já as telhas produzidas com a incorporação de 10% de lodo de ETA tanto no período chuvoso quanto no período de estiagem apresentaram valores de Absorção de Água superiores a 20%, valores estes inadmissíveis para esse tipo de produto.

Quando comparadas as médias de absorção para cada período do ano, o Teste t mostrou que existe diferença significativa ( $p < 5\%$ ), ou seja, a absorção de água é influenciada pela adição de lodo à massa cerâmica, conforme observado na Figura 27, tanto no período chuvoso quanto no período de estiagem.

Para os corpos de prova produzidos somente com massa cerâmica tanto no período chuvoso como no período de estiagem não apresentaram diferença significativa na absorção de água ( $p < 5\%$ ). Situação semelhante foi observada para os corpos cerâmicos produzidos nos dois períodos amostrais, ou seja, não existe diferença significativa de absorção de água entre as telhas produzidas em diferentes períodos do ano.

Aumento na absorção de água com a adição de lodo de ETA à massa cerâmica também foi observado por Monteiro *et al.* (2008), Oliveira e Holanda (2008), Tartari *et al.* (2011b) e Camargo (2014). Estes autores relatam ainda que o aumento exponencial de absorção com acréscimo de lodo pode estar relacionado ao aumento da porosidade e perda ao fogo.

**Figura 27.** Absorção de Água, com base nos valores médios, para as diferentes condições de produção das telhas.



#### 5.4.3. Carga de Ruptura à Flexão

A Tabela 11 apresenta os valores médios de carga de ruptura à flexão observados para as telhas produzidas em diferentes condições.

**Tabela 11.** Valores médios da carga de ruptura à flexão para as diferentes condições. (MC = massa cerâmica, LO = lodo de ETA).

Matéria-Prima	Carga de Ruptura à Flexão (N)
MC (chuvoso)	2014,32
MC + LO (chuvoso)	1818,44
MC (estiagem)	2386,13
MC + LO (estiagem)	1863,14

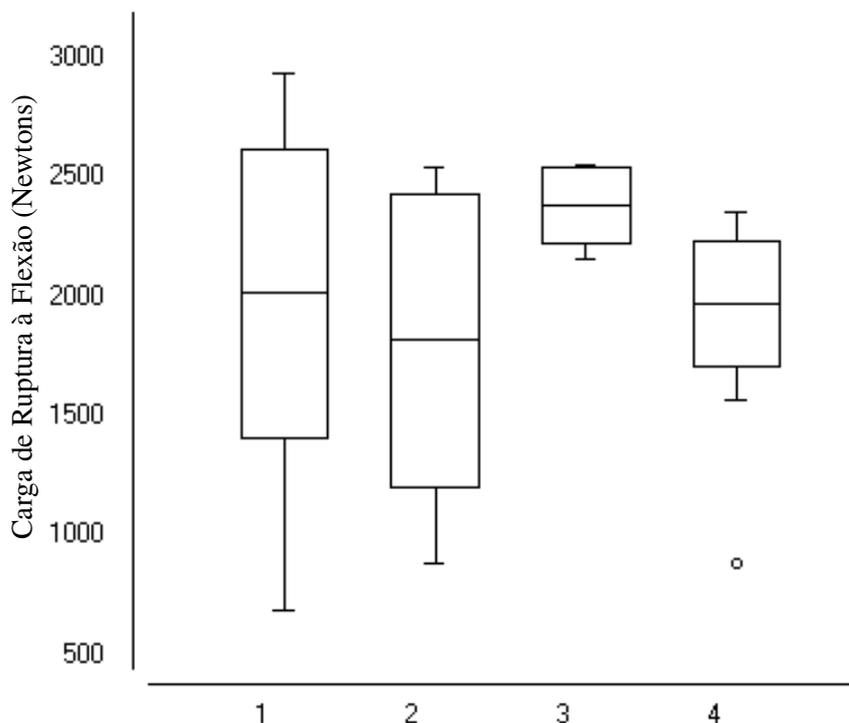
Os valores médios de Carga de Ruptura a Flexão atenderam ao disposto na NBR 15310 (ABNT, 2005) na qual prever valor mínimo admissível para telhas do tipo plan de 1000 Newtons.

Com base nestes resultados de flexão de ruptura à carga, o Teste t mostrou que não existe diferença significativa ( $p > 5\%$ ) entre as telhas produzidas, ou seja, a carga de ruptura não é influenciada pelo período do ano, nem pela adição do lodo à massa cerâmica, conforme observado na Figura 28.

Embora não seja uma diminuição significativa, a adição do lodo tende a diminuir a carga de ruptura, conforme observado na Figura 27. Esta mesma tendência de diminuição da tensão de ruptura a flexão de corpos cerâmicos produzidos a partir da

adição de lodo da ETA à massa cerâmica foram observadas por Monteiro *et al.* (2008), Paixão *et al.* (2008), Tartari (2008) e Camargo (2014).

**Figura 28.** Valor médio de carga de ruptura à flexão para as diferentes condições de produção dos corpos de prova. (1= massa cerâmica período chuvoso, 2 = 90% de massa cerâmica + 10% de lodo de ETA período chuvoso, 3 = massa cerâmica período de estiagem, 4 = 90% de massa cerâmica + 10% de lodo de ETA período de estiagem). Retângulo representa desvio padrão e os intervalos, valores mínimos e máximos.



Camargo (2014) associou esta diminuição ao aumento da porosidade provocada pela queima da matéria orgânica presente no lodo.

## 6. CONCLUSÕES

Várias pesquisas têm buscado alternativas para destinação adequada do lodo gerado nas estações de tratamento de água. Visto que o setor ceramista é uma opção para aproveitamento deste resíduo na fabricação de novos produtos, e com base nos resultados alcançados neste trabalho, conclui-se que:

- As características do lodo proveniente da ETA 006 de Palmas-TO são de um material desplastificante, devido as seguintes características: elevado percentual de areia e de matéria orgânica, baixa densidade, sendo incapaz de alterar a densidade inicial da massa cerâmica. Apresenta na composição química predominância de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e alta taxa de perda ao fogo.
- A incorporação de 10% de lodo à massa cerâmica não foi uma proporção adequada, já que os produtos apresentaram diversas deformações e alta taxa de absorção de água.
- Assim, a incorporação de lodo da ETA 006 para fabricação de produtos cerâmicos não se mostrou viável neste estudo e irá depender diretamente das características da massa cerâmica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDRE, J. **Análise de matéria-prima e composições de massa utilizada em cerâmicas vermelhas**. 2000. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos de Goytacazes, 2000.
- ANDRADE, F. L. F. **Estudo da formulação de massas cerâmicas provenientes da região do Seridó – RN para fabricação de telhas**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2009.
- ANDRADE, C. F.; SILVA, C. M.; OLIVEIRA, F. C. Gestão ambiental de saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas. In: V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Anais...** Belo Horizonte: IBEAS, p. 1-11, 2014.
- ARAÚJO, F. C.; SCALIZE, P. S.; ALBUQUERQUE, A.; ANGELIM, R. R. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. **Cerâmica**, v. 61, p. 450-456, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15310**: Componentes cerâmicos: Telhas: terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- AYRES, M.; AYRES, J. R. M.; AYRES, D. L.; SANTOS, A. S. **BioEstat 3.0: aplicações estatísticas**. Belém: Sociedade Civil Mamirauá/ Brasília: CNPq, 2003, 290p.
- BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. M. Lodos produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs): desidratação em leitos de secagem e codisposição em aterros sanitários. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.
- BITTENCOURT, S.; AISSÉ, M. M.; MARIN, L. M. K. S.; SIMÃO, C. C. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 315-324, 2012.
- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 de janeiro de 2007.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário**

**Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 de ago. 2010. Seção 1, p. 3-7.

BRASIL. Lei nº 6.050, de 24 de maio de 1974. Dispõe sobre a fluoretação de água em sistemas de abastecimento quando existir estação de tratamento. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 27 de maio de 1974.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e da outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 de fevereiro 1998.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 de agosto de 2010.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 de jan. 1997. Seção 1, p. 470.

BRASIL. **Manual de Saneamento**. 2 Ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2007. 408p.

BRASIL. Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 de dez. 2011.

BRASIL. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância, 2006, 212 p.

BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**, v. 3, n. 3, p. 31-36, 2000.

CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. S.; TANNO, L. C. Argilas para cerâmica vermelha. 2005, p. 583-605. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. 867p.

CAMARGO, C. N. O. **Avaliação do lodo amarelo de ETA para incorporação em cerâmica vermelha**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2014.

CAMPOS, L. F. A.; MACEDO, R. S. de; KIYOHARA, P. K.; FERREIRA, H. C. Características de Plasticidade de Argilas para uso em Cerâmica Vermelha ou Estrutural. **Cerâmica**, v. 45, n. 295, p. 140-145, 1999.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; PRIM, E. C. C.; PIMENTEL, F. J. G. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos**, v. 7, n. 2, p. 86-97, 2011.

COELHO, J. M. **Perfil de argilas para Cerâmica Vermelha**. Relatório Técnico. Belo Horizonte: J. Mendo Consultoria/ Banco Mundial/ Ministério de Minas e Energia, 2009. 30p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 de março de 2005.

CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999a. p. 1-19.

CORDEIRO, J. S. Remoção natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999b. p. 125-141.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). p. 119-142. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.

COUTO, V. M. P. **Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos derivados do processamento dos resíduos de estação de tratamento de água**. 2011. 120 f. Dissertação. (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química. Universidade Federal do Rio do Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CHRISPIM, Z. M. P.; ALMEIDA, L. L. P. de; ALVES, M. G.; RAMOS, I. S.; SILVA, A. L. Caracterização de solos residuais da região de Campos de Goytacazes/RJ para uso de engobes em cerâmica artística. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECiMat. **Anais...** Campo do Jordão, 2010. p. 311-318.

DE JULIO, M.; SANTOS, M. N. O.; OROSKI, F. I. Regeneração por via ácida do coagulante presente no lodo da Estação de Tratamento de Água Pitangui operada pela Sanepar de Ponta Grossa/PR. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 14-27, 2009.

DI BERNARDO, L.; SCALIZE, P. S.; SOUZA FILHO, A. G. Água de lavagem de filtros rápidos. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999a. p. 143-168.

DI BERNARDO, L.; CARVALHO, E. H.; SCALIZE, P. S. Disposição de resíduos líquidos de ETAs em ETEs. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999b. p. 169-202.

DONAGEMA, G. K. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011, 230p.

DONDE, M. Technological characterisation of clay materials: experimental methods and data interpretation. **International Ceramics Journal**, Faenza (Italy), p. 55-59, 2003.

DRUMOND, A. A. **Estudo em bancada da interferência na aplicação de resíduo de ETA no sistema de tratamento de esgoto**. 2013. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997, 212p.

FIGUEIREDO NETO, A. **Utilização de lodo de estação de tratamento de água na produção de mudas de árvores com ocorrência no cerrado**. 2011. 97p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2011.

FONTANA, A. O. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros – estudo de caso – ETA Cardoso**. 2004. 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2004.

FREITAS, J. G.; FERREIRA FILHO, S. S.; PIVELI, R. P. Viabilidade técnica e econômica de regeneração de coagulantes a partir de lodo de estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.10, n. 2, p. 137-145, 2005.

GONÇALVES, R. F. et al. Recuperação de Coagulantes de Lodos de Estações de Tratamento de Águas. In: REALI, M. A. P. (Org.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 203-225.

GUERRA, R. C. **Caracterização e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário**. 2005. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

GUERRA, R. C.; ANGELIS, D. F. D. Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 72, n. 1, p. 87-91, 2005.

GUIMARÃES, G. C. **Estudo do Adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília**. 2007. 118p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2007.

HELLER, L.; CASSEB, M. M. S. Abastecimento de água. In: BARROS, R. T. V.; CHERNICHARO, C. A. L.; HELLER, L.; SPERLING, M. von. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios**. v. 2. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1995, p. 63-112.

HELLER, L.; PADUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Volume 2, 2. Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 872p.

HIDROSAN ENGENHARIA. **Projeto básico do sistema de tratamento dos resíduos gerados na ETA 06 em Palmas/TO**. São Carlos, 2011, 99p.

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. **Cerâmica**, v. 51, n. 318, p. 85-95, mar. 2005.

JANUÁRIO, G. F.; FERREIRA FILHO, S. S. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 117-126, 2007.

LEGGERINI, M. R. C. **Materiais Cerâmicos**. In: Materiais, técnicas e estruturas I. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. 2004. 12p.

LEME, F. P. **Teoria e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1990. 610p.

LOPES, J. C. **Reaproveitamento do lodo da ETA-6 de Palmas-TO em substituição parcial ao agregado miúdo em matriz de concreto**. 2013. 76 f. Trabalho de Conclusão

de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2013.

MACHADO, L. C. G. T.; PEREIRA, J. A. R.; PONTE, M. X.; LOPES, L. N. A. Avaliação do aproveitamento agrícola do lodo produzido na ETA Bolonha-RMB. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. **Anais...** Florianópolis, 2004.

MARGEM, J. I. **Caracterização e Incorporação de Lodo de Decantação de Estação de Tratamento de Água (E.T.A) em Cerâmica Vermelha**. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos de Goytacazes, 2008.

MARTINS, T. J. C. **Sistemas de abastecimento de água para consumo humano: desenvolvimento e aplicação de ferramenta informática para a sua gestão integrada**. 2014. 113p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior Agrária. Bragança, 2014.

MEIRA, J. M. L. "Argilas: o que são, suas propriedades e classificações". **Visa Comunicações Técnicas**, p. 1-7, 2001.

MIKI, M. K., SOBRINHO, P. A.; VAN HAANDEL, A.C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: ANDREOLI, C. V., (Coord.). **Usos Alternativos de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto**. ABES, Rio de Janeiro, 2006, p. 49-108.

MIRANDA, L. A. S. **Sistemas e processos de tratamento de águas de abastecimento**. Porto Alegre: 2007, 148p.

MONTEIRO, S.N.; ALEXANDRE, J.; MARGEM, J. I.; SÁNCHEZ, R.; VIEIRA, C. M. F. Incorporation of Sludge from Water Treatment Plant into Red Ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1281–1287, 2008.

MORAIS, D. M.; SPOSTO, R. M. Propriedades tecnológicas e mineralógicas das argilas e suas influências na qualidade de blocos cerâmicos de vedação que abastecem o mercado do Distrito. **Cerâmica Industrial**, v. 11, p. 35-38, 2006.

MOREIRA, R. C. A.; BOAVENTURA, G. R.; NASCIMENTO, C. T. C.; GUIMARÃES, E. M.; OLIVEIRA, R. P. Uso do lodo químico, rico em alumínio, produzido pela Estação de Tratamento de Água rio Descoberto para a recuperação de uma área degradada. **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n. 1, p. 22-35, 2007.

MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; BOAVENTURA, G. R. Estudo Geoquímico da disposição de lodo de estação de tratamento de água em área degradada. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2085-2093, 2009.

MORUZZI, R. B.; FERRARI, T. N. Incorporação do lodo gerado na Estação de tratamento de água (ETA II) do município de Rio Claro-SP em argila utilizada para a produção de cerâmica vermelha. In: 4º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2008, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: AEAPG, 2008. 11 f.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1997, 292p.

MULLER, E. A. **Avaliação do uso de lodos de Estação de Tratamento de Água como matéria-prima na confecção de tijolos cerâmicos: estudo de caso - ETA Bolonha**.

2009. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, p. 167-173, 2008.

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**, v. 50, p. 324-330, 2004.

OLIVEIRA, N. S. **Estudo da secagem de lodo de Estação de Tratamento de Água**. 2010. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

OMOTO, E. S. Avaliação do descarte de lodo da ETA diretamente na rede coletora de esgotos. In: I Encontro das Águas, 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: SINTERCON, 2000.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. Effect of addition of high iron content sludge from water treatment plant on a clay-based ceramic. **Cerâmica**, v. 54, n. 329, p. 63-76, 2008.

PALMAS. Prefeitura Municipal de Palmas. **Plano Municipal de Saneamento Básico – PMSB Palmas**. Volume II: Água e Esgoto. Palmas, 2014. 174p.

PEREIRA, S. L. M. **Características físicas, químicas e microbiológicas do lodo das lagoas da ETA Gramame**. 84 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

PINHEIRO, B. C. A., HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 56, p. 237-243, 2010.

PORRAS, A. C.; ISAAC, R. L.; MORITA, D. Use of dry sludge from a treatment water plant station and aggregated recycled from civil construction in the manufacture of cement soil bricks. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, v. 18, n. 2, p. 5-28, 2008.

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

PRIM, E. C. C. **Utilização de lodo de Estação de Tratamento de Água e Esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. 2011. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 340p.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influence of the incorporation of water treatment plant (WTP) sludge on the technological properties of soil-cement bricks. **Cerâmica**, v. 59, p. 551-556, 2013.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da Fase Sólida de Lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa/ ABES/ PROSAB, 2001. p. 245 - 257.

SANEAMENTO DE GOIÁS S/A. **Manual de Operação de Estação de Tratamento de Água**. Goiás: SANEAGO, 2006. 150p.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. Ed. São Paulo: Edgar Blucher, v. 1, 1989.

SANTOS, I. S. S.; RAMIRES, M. V. V.; KAZMIERCZAK, 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. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2000. 8p.

SEBRAE. **Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos**. Estudos de Mercado Sebrae - ESPM, 2008, 41p.).

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de Estação de Tratamento de Água**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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. In: 3º International Workshop Advances in Cleaner Production. **Anais...** São Paulo, 2011.

SIQUEIRA JUNIOR, B. **Caracterização de resíduos de Estação de Tratamento de Água e estudo de reaproveitamento na indústria de cerâmica vermelha**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2011.

SOARES, L. A.; SCALIZE, P. S.; ALBUQUERQUE, A. J. C. Caracterização de resíduo de ETA visando sua disposição na saída de lagoas de estabilização. **Revista de Monografias Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 3154-3163, 2014.

SOUZA, W. A. **Tratamento de água**. Natal: CEFET/RN, 2007. 149 p.

TAKADA, C. R. S.; SERRA, J. C. V.; MAFRA, W. A.; BORBA, K. C. A. Aproveitamento e disposição final de lodos de Estações de Tratamento de Água no município de Palmas – TO. **Engenharia Ambiental**, v.10, n. 2, p. 157-165, 2013.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica**, v. 57, p. 288-293, 2011a.

TARTARI, R.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A.; DÍAZ-MORA, N. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte II: Incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 57, p.387-394, 2011b.

TARTARI, R. **Incorporação de lodo gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; SOUZA, N. R. de; JOB, A. E.; GOMES, H. M.; HEITZMANN NETO, J. F. Caracterização de resíduo de estações de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE) e o estudo da viabilidade de seu uso pela indústria cerâmica. In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitariay Ambiental. **Anais...** México: AIDIS, 2002.

TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na Agricultura**. 2. Ed. São Paulo: ABES, 2002, 468p.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Incorporation of solid waste in red ceramics – an up dated review. **Revista Matéria**, v.14, n. 3, p. 881-905, 2009.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 57, p. 319-323, 2011.

VITORINO, J. P. D.; MONTEIRO S. N.; VIEIRA C. M. F. Characterization and incorporation of wastes from Water Treatment Plant into clayey ceramic. **Cerâmica**, v. 55, p.385-392, 2009.

WIECHETECK, G. K.; CORDEIRO, J. S. Gestão Ambiental de sistemas de tratamento de água. In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental. **Anais...** México: AIDIS, 2002.