



Universidade Federal de Pelotas
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**

Defesa de Mestrado

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS
CERÂMICOS.**

Eduardo Echevengú Barcellos
Tecnólogo em Gestão Ambiental

Pelotas, 2013

Eduardo Echevengúá Barcellos
Tecnólogo em Gestão Ambiental

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS
CERÂMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito para obtenção de título.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Margarete R. F. Gonçalves

Pelotas, 2013

Eduardo Echevengú Barcellos
Tecnólogo em Gestão Ambiental

**AValiação DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS
CERÂMICOS**

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 13 de setembro de 2013

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann (Orientador)

Doutor em Engenharia pelo Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Alemanha.

Prof^a. Dr^a. Margarete Regina Freitas Gonçalves (Co-orientadora)

Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Prof^a. Dr^a. Annelise Kopp Alves

Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Prof^a. Dr^a. Andrea Pokorny Chiappin

Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Resumo

BARCELLOS, Eduardo Echevengua. **AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS**. 2013. 76f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Neste trabalho, avaliou-se a inserção de um resíduo sólido seco, proveniente de tratamento de esgoto, denominado lodo, em uma massa cerâmica a base de argilas. O lodo seco foi coletado no estado bruto na Estação de Tratamento de Esgoto Parque Marinha, localizada no município de Rio Grande, RS, e a massa cerâmica foi obtida na Olaria Guido Einhardt, localizada no município de Pelotas, RS. Para o desenvolvimento do trabalho, inicialmente, caracterizou-se quimicamente o lodo e a massa cerâmica a base de argilas. Posteriormente, foram elaboradas formulações com 0, 5, 10, 20 e 40% em peso de lodo adicionado a massa cerâmica, que foram queimadas nas temperaturas de 850, 900, 950, 1000, 1050°C. Nos corpos de prova obtidos foram determinadas as propriedades de retração linear, porosidade aparente, absorção de água, resistência a flexão a quatro pontos, de viabilidade ambiental segundo a norma ABNT NBR 10.004/2004 e aplicação tecnológica do produto obtido. Como resultado, as formulações com lodo adicionado, até 10%, atingiram, satisfatoriamente, requisitos das normas ABNT para produtos cerâmicos para utilização como blocos cerâmicos de vedação e alvenaria estrutural, para quase todas as temperaturas de queima, exceto na temperatura de queima de 850°C para a formulação de 10%. Para as outras formulações, foram atingidos requisitos mínimos da norma com algumas restrições. Como viabilidades ambientais, feitas somente nas formulações de massa que apresentaram o melhor comportamento mecânico, capazes de terem uma aplicação tecnológica, foram classificados como Classe IIB – Inerte, pela norma ABNT NBR10004/2004.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Reciclagem. Produção cerâmica.

Abstract

BARCELLOS, Eduardo Echevengúá. **EVALUATION OF INCORPORATION OF SLUDGE SEWAGE TREATMENT PLANT AS RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF CERAMIC MATERIALS.** In 2013. 76f. Thesis (Master) - Master's Graduate Program in Science and Engineering of Materials. Federal University of Pelotas, Pelotas.

In this work, the insertion of a dry solid waste from sewage treatment, called sludge, in a ceramic. The dried sludge in crude form was collected at Estação Parque Marinha, located in the municipality of Rio Grande - RS and mass based ceramic clays was obtained in Olaria Guido Einhardt, located in the municipality of Pelotas - RS. For development work, initially, was characterized chemically the sludge and the mass based ceramic clays. Then, were prepared formulations with 0, 5, 10, 20 and 40% by weight of sludge added to the ceramic mass, they are burned at temperatures of 850, 900, 950, 1000, 1050°C. In bodies of the test obtained were determined properties of linear shrinkage, apparent porosity, water absorption, flexural strength to four points, environmental viability according to ABNT NBR 10.004/2004 and technological application of the product. As a result, the formulations sludge added, up to 10%, attained satisfactorily standard requirements for use as ceramic blocks and masonry for almost all firing temperatures, except at the firing temperature of 850°C for the formulation of 10%. For all other formulations, minimum requirements of the standard were met with some restrictions. As environmental feasibilities, made only in the formulations mass that had the best mechanical strength, able to have a technological application, were classified as Class IIB - Inert, by the ABNT NBR10004/2004.

Keywords: Sewage sludge. Recycling. Ceramic production.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: FORMAS DE REDUÇÃO DE VOLUME DE LODO.	29
FIGURA 3.2: MAPEAMENTO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARQUE MARINHA, LOCALIZADA NA AVENIDA DOS GRANDES LAGOS, RIO GRANDE/RS.....	30
FIGURA 3.3: FLUXOGRAMA DO SISTEMA AERADO-BIOLÓGICO UTILIZADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARQUE MARINHO, RIO GRANDE/RS.....	31
FIGURA 3.4: CONSTITUINTES DO SISTEMA AERADO-BIOLÓGICO DA ETE PARQUE MARINHA, LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE/RS: (A) TANQUE DE RECEPÇÃO DE ESGOTO; (B) CAIXA DESARENADORA; (C) TANQUE DE AERAÇÃO; (D) GRADEAMENTO; (E) DECANTADOR; (F) LEITO DE SECAGEM DE LODO.....	32
FIGURA 3.5: FLUXOGRAMA DA PRODUÇÃO DE MATERIAL CERÂMICO	35
FIGURA 4.1 FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DAS ETAPAS DA PARTE EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA NESTE TRABALHO.	43
FIGURA 4.2: COLETA DO LODO NO LEITO DE SECAGEM DA ETE PARQUE MARINHA, RIO GRANDE/RS.....	45
FIGURA 4.3: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (ATG) DO LODO DE ETE.	46
FIGURA 4.4: ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (ATD) DO LODO DE ETE.....	47
FIGURA 4.5: A) PRENSA UTILIZADA NA PRENSAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA; B) CORPO-DE-PROVA LOGO APÓS PRENSAGEM.	48
FIGURA 4.6: DISPOSIÇÃO DO CORPO-DE-PROVA NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO A 4 PONTOS.....	50
FIGURA 4.7: POSICIONAMENTO DO CORPO-DE-PROVA PARA O ENSAIO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS NA MÁQUINA DE ENSAIO UNIVERSAL DA MARCA SHIMADZU.	51
FIGURA 5.1: VARIAÇÃO DA COR DE QUEIMA DOS CORPOS DE PROVA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA E DA QUANTIDADE DE LODO NA SUA FORMULAÇÃO.....	52
FIGURA 5.2: RETRAÇÃO LINEAR DE CORPOS DE PROVA DE MASSA CERÂMICA PURA E ADITIVADA COM LODO DE ETE, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA E DA QUANTIDADE DE LODO ADICIONADA.....	53
FIGURA 5.3: POROSIDADE APARENTE DE CORPOS DE PROVA DE MASSA CERÂMICA PURA E ADITIVADA COM LODO DE ETE, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA E DA QUANTIDADE DE LODO ADICIONADA.....	54

FIGURA 5.4: ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS CORPOS DE PROVA DE MASSA CERÂMICA PURA E ADITIVADA COM LODO DE ETE, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA E DA QUANTIDADE DE LODO ADICIONADA. **55**

FIGURA 5.5: RESISTÊNCIA A FLEXÃO A QUATRO PONTOS DOS CORPOS DE PROVA DE MASSA CERÂMICA PURA E ADITIVADA COM LODO DE ETE, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA E DA QUANTIDADE DE LODO ADICIONADA. **56**

FIGURAS 5.6 ESTIMATIVA DE APLICAÇÃO TECNOLÓGICA DAS MASSAS CERÂMICAS COM LODO DE ETE EM FUNÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA E DA RESISTÊNCIA A FLEXÃO A QUATRO PONTOS. **61**

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: PARÂMETROS DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES PARA SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS.....	21
TABELA 3.2: PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.	22
TABELA 3.3: PADRÕES DE LANÇAMENTO.....	22
TABELA 3.4: TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO: NÍVEIS, POLUENTES E OPERAÇÕES.	23
TABELA 3.5 - ANÁLISE DO EFLUENTE TRATADO DA ETE PARQUE MARINHA, NOVEMBRO/2011.....	33
TABELA 3.6: TIPO DE SECAGEM PRATICADA PELA INDÚSTRIA DE MATERIAIS CERÂMICOS.	37
TABELA 4.1: COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X DA MASSA CERÂMICA UTILIZADA NESTE TRABALHO.	44
TABELA 4.2: COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DO LODO DE ETE UTILIZADO NESTE TRABALHO.	45
TABELA 5.1: ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO PARA AS FORMULAÇÕES DE 0, 5 E 10% DE LODO ADICIONADOS A UMA TEMPERATURA DE QUEIMA DE 900°C.	58
TABELA 5.2: APLICAÇÃO TECNOLÓGICA PARA MATERIAIS CERÂMICOS CONFORME NORMAS DA ABNT.	59

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

CONSEMA: Conselho Estadual de Meio Ambiente

CP: Corpo de Prova

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DP: Desvio Padrão

DQO: Demanda Química de Oxigênio

ETA: Estação de Tratamento de Água

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

N: Nitrogênio

OD: Oxigênio Dissolvido

P: Fósforo

PIB: Produto Interno Bruto

PNRH: Política Nacional de Recursos Hídricos

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

SS: Sólidos Suspensos

SINDICER: Sindicato de Olaria e de Cerâmica para Construção no Estado do Rio Grande do Sul

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GERAL.....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. EFLUENTES	18
3.1.1. LEGISLAÇÃO PARA O LANÇAMENTO DE EFLUENTES.....	20
3.1.2. TRATAMENTO DE EFLUENTES	22
3.1.3. LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	27
3.2. ETE PARQUE MARINHA.....	29
3.3. PRODUÇÃO CERÂMICA	33
3.3.1. ARGILAS	33
3.3.2. PROCESSAMENTO CERÂMICO.....	34
3.3.2.1. FORMULAÇÃO	35
3.3.2.2. CONFORMAÇÃO	36
3.3.2.3. SECAGEM	36
3.3.2.4. QUEIMA.....	37
3.4. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS À MASSA CERÂMICA.....	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 MATERIAS-PRIMAS	44
4.1.1 MASSA CERÂMICA	44
4.1.2 LODO DE ETE.....	44
4.2 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	47
4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS	48
4.3.1 RETRAÇÃO LINEAR	48
4.3.2 POROSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	49

4.3.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA	49
4.3.4 IMPACTO AMBIENTAL	51
4.3.5 AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO TECNOLÓGICA.....	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 COR DE QUEIMA.....	52
5.2 RETRAÇÃO LINEAR, POROSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA	53
5.3. ENSAIO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS	56
5.4. ANÁLISE AMBIENTAL	57
5.5. APLICAÇÃO TECNOLÓGICA.....	58
6. CONCLUSÕES	62
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	64
8. REFERÊNCIAS.....	65
9. ANEXOS.....	73

1. INTRODUÇÃO

O crescimento econômico e populacional ocorrido nas últimas décadas determinou um aumento na geração dos mais variados resíduos sólidos e uma progressiva degradação ambiental, advinda, principalmente, das formas inadequadas de descartes desses resíduos. Um manejo adequado destes em toda a sua cadeia (produção, transformação e reutilização) pode contribuir de forma significativa para a preservação do meio ambiente e conseqüente melhoria da qualidade de vida de toda a Sociedade (MENEZES, 2006).

A exemplo disto, cita-se a possível redução de riscos de poluição ao meio ambiente provocada pelo tratamento dado ao esgoto residencial coletado nas redes de saneamento, o qual é encaminhado para as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Nesse processo, é gerado um resíduo, rico em matéria orgânica e nutrientes, identificado como lodo de esgoto ou lodo de estação de tratamento de esgoto, que, sem dúvida, merece destaque diante do volume de massa gerado sem destino efetivo (COSTA *et al.*, 2008). A característica do lodo de ETE é resultante do tratamento a que é submetido que pode ser químico, físico e/ou biológico (JIN *et al.*, 2003).

Segundo Araújo *et al.* (2010), a causa para o aumento da produção *per capita* de resíduos sólidos gerados pelo homem e dos danos provocados ao meio ambiente está na falta de políticas gerenciais, tecnologias de reuso e educação ambiental que levem à disposição adequada dos mesmos. Estudos para identificar usos alternativos para este resíduo estão sendo feitos, visando à agregação de valor, benefícios à Sociedade e redução de impacto ambiental.

Em países da Europa e da América do Norte, o lodo de tratamento de esgoto geralmente é incinerado e depositado em aterros sanitários ou utilizado em áreas agrícolas (SANTOS *et al.*, 2011). Já em países em desenvolvimento, a gestão de resíduos do lodo de ETE, por ser bastante complexa, representa entre 20% e 60% dos custos operacionais de uma estação de tratamento e é, por isto, ainda negligenciada (FERNANDES *et al.*, 2001).

No Brasil, um dos grandes problemas vivenciado a partir do crescimento industrial e populacional e da ausência de planejamento urbano é a falta de

saneamento básico. Muitas cidades do país desconhecem a sua existência e até o seu significado (NUNES *et al.*, 2010). É comum o descarte do lodo de ETE em lixões a céu aberto ou em aterros sanitários. Na tentativa de modificar esta situação, atualmente, trabalhos vêm sendo feitos, a partir de ações preventivas de redução e de reciclagem. Como exemplos de reciclagem, cita-se as pesquisas de aplicação como matéria-prima no fabrico de produtos cerâmicos (VICENZI *et al.*, 2005), em matrizes de concreto em substituição a brita (MENEZES, 2006) e na incorporação em massas argilosas onde, segundo Teloeken *et al.* (2011), os resultados vêm mostrando ser esta uma alternativa eficiente e definitiva porque o processo de vitrificação torna inerte os contaminantes presentes no resíduo, evitando a sua lixiviação para o meio ambiente.

A utilização do lodo de ETE em processos de reciclagem, além de evitar a sua deposição em lugares inadequados e a contaminação do solo e da água, possibilitaria a redução do custo de gerenciamento das ETEs, públicas e privadas.

Somada a problemática da reciclagem do lodo de ETEs, atualmente, no Brasil e no mundo, convive-se com as questões ligadas à construção civil que vem sendo cobrada de uma maior conscientização quanto à redução de resíduos e à proteção ao meio ambiente. Tais fatos têm gerado um novo mercado de produtos voltado à oferta de materiais ecológicos e de construção sustentável, o que tem feito com que as pesquisas focadas na obtenção de novas fontes de matérias-primas para os produtos da construção civil ganhem lugar de destaque.

Um estudo da viabilidade técnica e ambiental da utilização de um resíduo industrial, como o lodo de uma Estação de Tratamento de Esgoto, como de matéria-prima alternativa para a obtenção de materiais cerâmicos argilosos destinados ao mercado da construção civil, requer o domínio da relação entre os parâmetros do processamento cerâmico e as características dos produtos obtidos. É nesse contexto que se insere este trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo avaliar a incorporação de um lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) na obtenção de massa cerâmica argilosa para a produção de materiais cerâmicos destinados à construção civil.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral acima, será necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Coleta e caracterização química de amostras de lodo de ETE e de uma massa cerâmica à base de argilas;
- Obtenção de corpos cerâmicos a partir de massas cerâmicas aditivadas com lodo de ETE;
- Caracterização física (retração linear, porosidade aparente e absorção de água) e mecânica (resistência a ruptura) dos corpos cerâmicos obtidos;
- Análise de impacto ambiental (lixiviação e solubilização de resíduos) dos corpos cerâmicos produzidos com massas cerâmicas contendo lodo da ETE;
- Avaliação da aplicação tecnológica dos corpos cerâmicos produzidos com massas cerâmicas contendo lodo da ETE.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de resíduos sólidos urbanos como fonte de energia e de matéria-prima contribui para a conservação do ambiente e a melhoria na qualidade de vida da população. A relação desses dois fatores permite um ambiente conservado e proporciona um desenvolvimento sustentável (TUCCI, 2007).

A Lei Federal Nº. 9.433, Cap. I, art. 1º, de 08/01/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), define que

“a água é um bem de domínio público; é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do poder público, dos usuários e das comunidades”.

A existência desta lei, no entanto, não foi capaz de coibir a ação do homem que através da geração de efluentes e de diversas outras atividades polui os rios comprometendo a qualidade dos mananciais de água.

Segundo Barcellos *et al.* (2012), vários são os indicadores que podem revelar contextos particulares relacionados aos problemas de saúde da população, que fornecem pistas para o estabelecimento de políticas específicas de combate à poluição focadas para cada região. A cobertura da rede de coleta de esgoto, a contaminação da água na rede de abastecimento, a possível contaminação das fontes de água, o tratamento inadequado ou insuficiente da água, a irregularidade do abastecimento e a interação entre água e o esgoto no solo no entorno do domicílio permitem uma avaliação mais contextualizada do problema de saneamento.

Os mananciais de água são comprometidos pelos poluentes que os atingem, segundo Pereira (2004), sendo as formas de poluição definidas como: Poluição Pontual, Poluição Difusa e Poluição Mista.

A poluição Pontual refere-se àquelas onde os poluentes são lançados de forma individualizada e em pontos específicos das fontes de água. As emissões ocorrem de forma controlada, podendo-se identificar um padrão médio de

lançamento. Exemplos típicos desta forma de poluição são as indústrias e as estações de tratamento de esgoto.

A poluição Difusa ocorre quando os poluentes atingem as fontes de água de modo aleatório, não havendo possibilidade de estabelecer qualquer padrão de lançamento, seja em termos de quantidade, frequência ou composição. Esse é o caso típico da drenagem pluvial na qual a poluição é distribuída de forma generalizada, não concentrada. Exemplo típico desta forma de poluição são os acidentes com produtos químicos ou combustíveis.

A poluição Mista é aquela que engloba características de cada uma das fontes citadas anteriormente.

Em alguns países desenvolvidos já se trabalha no controle da poluição difusa tendo em vista o fato da poluição pontual já ter sido equacionada. Já em países em desenvolvimento, como o Brasil, a questão prioritária é a de tratamento dos esgotos como forma de evitar a degradação e o desperdício dos recursos hídricos.

No Brasil, um dos grandes problemas vivenciado é a da falta de saneamento básico, resultante do crescimento industrial e populacional e da ausência de planejamento urbano. Muitas cidades do país ainda desconhecem a sua existência e até o seu significado (NUNES *et al.*, 2010). Tal situação tem levado a gastos de bilhões de reais por ano com doenças de veiculação hídrica, devido à falta de esgotamento sanitário dos dejetos no Brasil, responsáveis por 80% das doenças e por 65% das internações hospitalares (MORETTO *et al.*, 2010).

Segundo Tonetti *et al.* (2009), a busca por tecnologias mais eficientes nos aspectos econômicos e ambientais e aplicáveis às pequenas comunidades urbanas e rurais é necessária para que a Sociedade alcance o equilíbrio no uso da água, garantindo condições saudáveis de utilização deste recurso tão importante.

Em 2004, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) desenvolveu um trabalho que resultou no mapeamento das redes de saneamento do território brasileiro e no lançamento do Atlas de Saneamento, que indica a presença de redes de água, esgoto, serviços de coleta de lixo e limpeza urbana na maioria dos municípios brasileiros, buscando proteger os mananciais de água. Preocupado com o crescimento da poluição via efluentes, mais recentemente, em 2011, o IBGE

fez uma nova pesquisa para identificar a situação do Brasil quanto à condição de oferta e demanda de infraestrutura sanitária e, também, sobre a qualidade dos serviços prestados pelas entidades públicas e privadas de saneamento nos municípios brasileiros. Na pesquisa, foi identificado que, no período de 2000 a 2008, o único serviço de saneamento que não chegou próximo à totalidade de municípios foi a coleta de esgoto por rede geral. Entretanto, nos municípios em que o serviço existia, houve, no mesmo período, um aumento dos que registraram ampliação ou melhoria no sistema de esgotamento, de 58% para 79,9% do total, e dos domicílios atendidos, de 33,5% para 44%. A pesquisa também indicou que 55,2% dos municípios brasileiros tinham serviço de esgotamento sanitário por rede coletora e que a principal solução adotada pelos municípios que não possuíam rede de coleta de esgoto sanitário foi a construção de fossas sépticas.

De acordo com Mondardo *et al.* (2009), de maneira geral, a produção de esgotos corresponde a aproximadamente o consumo de água. No entanto, a fração de esgotos que adentra a rede de coleta é cerca de 80%. Essa fração é conhecida como coeficiente de retorno. Segundo o autor, a quantidade de água fornecida pela rede coletora de esgoto a rede pluvial, denominada coeficiente de retorno, é de 60% a 100%, sendo que um valor usualmente adotado tem sido o de 80% ($R= 0,8$). O cálculo da vazão média do coeficiente de retorno de esgoto/água é obtido pela Equação 1.1.

$$R = \text{vazão de esgotos/vazão de água} \quad (\text{Equação 1.1})$$

Como cita Costa (2006), o esgoto tem alto potencial poluidor e caráter tóxico, tanto para vida humana quanto animal, por isso requer uma série de tratamentos visando diminuir os seus malefícios.

Somada à contaminação das águas, têm-se a poluição gerada pelos resíduos sólidos, os lodos, que são classificados como resíduos sólidos pertencentes à Classe II - não perigosos, de acordo com NBR-10004 (ABNT, 2004). Estes não podem ser lançados nos cursos d'água sem o devido tratamento, já que esta prática é considerada crime ambiental por causar efeitos diretos ao ambiente aquático do corpo receptor, provocando danos à fauna aquática. Assim, se torna

necessário o estudo da disposição final adequada do resíduo a fim de contribuir para diminuir impactos ambientais (FADANELLI e WIECHETECK, 2010).

Para Pecora (2006), a geração de resíduos sólidos urbanos e rurais e efluentes industriais e comerciais é diretamente proporcional à quantidade de habitantes e seus hábitos de consumo. A coleta, tratamento e disposição adequada desses resíduos evitam a presença de vetores patogênicos, melhoram a qualidade das águas dos rios e subterrâneas e a vida da população.

O resíduo sólido produzido do tratamento de esgoto na ETE possui diferentes disposições finais dentre elas a incineração, a reciclagem via utilização agrônômica na vermicompostagem e a incorporação em artefatos cimentícios e cerâmicos (BARCELLOS *et al.*, 2009).

3.1. EFLUENTES

Efluentes são despejos líquidos lançados no meio ambiente, resultantes de esgotos industriais e domésticos, urbanos e rurais.

Os efluentes domésticos são constituídos de, aproximadamente, 99,9% de água. A fração restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microorganismos. Ainda que muito pequena essa fração de 0,1%, necessita ser tratada (SPERLING, 2005). A característica dos esgotos é função dos usos à qual a água foi submetida. Esses usos e a forma com que são exercidos variam com o clima, situação social e econômica, e hábitos da população.

Os efluentes industriais são mais poluentes visto que, em geral, resultam de processos químicos contaminantes. Atualmente, para as indústrias, muitas são as motivações para o tratamento dos resíduos e o reaproveitamento da água industrial, tais como a escassez de água potável no planeta, o aumento do custo da água tratada e os critérios, cada vez mais rígidos, de descarte de efluentes. Nesta conjuntura, as indústrias que não necessitam de água processada com qualidade potável são as que têm maior potencial para o reaproveitamento (JUNIOR *et al.*, 2011).

De acordo com Oliveira *et al.* (2006), para reduzir a disseminação de doenças veiculadas à água contaminada, evitar a poluição das águas superficiais e

subterrâneas e diminuir a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que significa quanto um efluente é biodegradável, as águas de esgoto devem ser tratadas em corpos de água receptores antes de seu lançamento.

No entanto, nas estações de tratamento de esgoto, normalmente, não há interesse em se determinar os diversos compostos dos quais a água residuária é constituída, tendo em vista a complexidade das análises de laboratório que seriam necessárias e a pequena utilidade prática desses resultados como elementos para subsidiar o projeto e a operação da mesma. Desta forma, é preferível a utilização de parâmetros indiretos que traduzam o potencial poluidor do despejo em questão. Esses parâmetros são divididos em três categorias: físicos, químicos e biológicos (COSTA *et al.*, 2009):

Os **parâmetros físicos** são em função de partículas sólidas suspensas ou em estado coloidal (orgânicas ou inorgânicas) que alteram a transparência (turbidez) e a cor da água, podendo precipitar-se na forma de lodo. Outras substâncias dissolvidas também poderão conferir alterações de cor, manifestação de odor e variações de temperatura. Como exemplos de parâmetros físicos citam-se os sólidos totais, sólidos totais dissolvidos, sólidos sedimentáveis, etc.

Os **parâmetros químicos** constituem-se de substâncias orgânicas e inorgânicas solúveis. A fração orgânica é representada por proteínas, gorduras, hidratos de carbono, fenóis e por uma série de substâncias artificiais, fabricadas pelo homem, como detergentes e defensivos agrícolas. As substâncias minerais mais importantes são os nutrientes nitrogênio e fósforo, o enxofre, metais pesados e compostos tóxicos. Como exemplos de parâmetros químicos, estão a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), nitratos, nitritos, nitrogênio amoniacal, orto-fosfato, etc..

Os **parâmetros biológicos** são representados pelos seres vivos liberados junto com os dejetos humanos. Alguns desses seres habitam normalmente o trato intestinal do homem sem prejuízo à saúde; porém, outros podem causar doenças e são denominados organismos patogênicos. Dentre estes parâmetros citam-se bactérias, coliformes fecais, vírus, fungos, helmintos e protozoários.

Para o tratamento dos parâmetros de poluição, são feitas operações físicas e processos químicos e biológicos unitários. As **operações físicas unitárias** se

caracterizam por métodos de tratamento no qual predomina a aplicação de forças físicas, tais como gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação e filtração. Os **processos químicos unitários** são métodos de tratamento nos quais a remoção ou conversão de contaminantes ocorre pela adição de produtos químicos ou devido a reações químicas, capazes de promoverem precipitação, adsorção e desinfecção. E, os **processos biológicos unitários** são métodos de tratamento nos quais a remoção de contaminantes ocorre por meio de atividade biológica do tipo remoção da matéria orgânica carbonácea e desnitrificação.

O conhecimento e as formas de tratamento dos parâmetros físicos, químicos e biológicos são de extrema importância para a eficiência do processo na ETE. O lançamento de qualquer um dos parâmetros físicos, químicos e biológicos fora do padrão pode alterar, significativamente, o ambiente, causando poluição hídrica e danos ambientais e à saúde humana.

3.1.1. LEGISLAÇÃO PARA O LANÇAMENTO DE EFLUENTES

Visando reduzir o problema da saúde da população, a partir da proteção do meio ambiente e dos recursos hídricos, em 13 de maio de 2011 entrou em vigor a Resolução nº 430 do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2011), que dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes e complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.

Esta Resolução define como **Lançamento Direto** de efluentes quando ocorre a condução direta deste ao corpo receptor (água) e **Lançamento Indireto** de efluentes quando ocorre a condução deste, submetido ou não a um tratamento, por meio de rede coletora que recebe outras contribuições antes de atingir o corpo receptor (água). Na Seção III, art. 21 desta resolução, que trata das condições e padrões de efluentes de tratamento de esgotos sanitários, defini-se que para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários deverão ser obedecidas as seguintes condições e padrões específicos apresentadas na Tabela 3.1.

As condições e padrões de lançamento relacionados nesta Resolução poderão ser aplicáveis aos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, a critério

do órgão ambiental competente, em função das características locais, não sendo exigível o padrão de nitrogênio amoniacal total.

Tabela 3.1: Parâmetros de lançamento de efluentes para sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

Itens	Padrões de lançamento
pH	Entre 5 e 9
Temperatura	>40°C
Materiais sedimentáveis	>1 mL/L
DBO5 (20°C)	>120 mg/L
Óleos e Graxas	>100 mg/L
Materiais flutuantes	Ausência

Fonte: Resolução CONAMA nº 430/11, adaptado pelo autor.

O Estado do Rio Grande do Sul, desde 7 de Setembro de 2006, por meio da Resolução nº 128/06 do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA), possui uma legislação própria que dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado.

Esta Resolução estabelece padrões de emissão em função da vazão dos rios e cita que para efluentes líquidos domésticos, em função da vazão de lançamento, devem ser observados os padrões de emissão para os parâmetros DBO5, DQO, Sólidos Suspensos (SS), apresentados na Tabela 3.2, e os parâmetros fósforo e *Coliformes Termotolerantes* ou *Escherichia Coli* apresentados na Tabela 3.3, devendo atender aos valores de concentração estabelecidos ou operarem com a eficiência mínima fixada.

Tabela 3.2: Padrões de Lançamento de efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul.

Faixa de Vazão (m³/d)	DBO₅ (mg O₂/L)	DQO (mg O₂/L)	SS (mg/L)
Q < 20	180	400	180
20 ≤ Q < 100	150	360	160
100 ≤ Q < 200	120	330	140
200 ≤ Q < 500	100	300	100
500 ≤ Q < 1000	80	260	80
1000 ≤ Q < 2000	70	200	70
2000 ≤ Q < 10000	60	180	60
10000 ≤ Q	40	150	50

Fonte: CONSEMA 128/06, adaptado pelo autor.

Tabela 3.3: Padrões de Lançamento.

Faixa de vazão (m³/d)	Fósforo Total		Coliformes Termotolerantes	
	Concentração (mg P/L)	Eficiência (%)	Concentração (NMP/100 mL)	Eficiência (%)
Q < 200	-	-	-	-
200 ≤ Q < 500	-	-	10 ⁵	90
500 ≤ Q < 1000	-	-	10 ⁵	95
1000 ≤ Q < 2000	3	75	10 ⁵	95
2000 ≤ Q < 10000	2	75	10 ⁴	95
10000 ≤ Q	1	75	10 ³	99

Fonte: CONSEMA 128/06.

3.1.2. TRATAMENTO DE EFLUENTES

Para o atendimento a legislação de lançamento de efluentes industriais e domésticos estes são tratados a partir de um processo com quatro níveis, identificados como preliminar, primário, secundário e terciário. Dependendo do efluente, os níveis diferem em suas operações. Entretanto, independente do tipo de

efluente, o nível secundário é o principal para o cumprimento dos padrões de lançamentos (SPERLING, 2005).

O tratamento de efluentes industriais envolve operações necessárias à remoção de impurezas geradas na fabricação de produtos de interesse. Os métodos de tratamento estão diretamente associados ao tipo de efluente gerado, ao controle operacional da indústria e às características da água utilizada. Além disso, o rejeito deve ser descartado de forma que não confira ao corpo receptor características em desacordo com padrões estabelecidos por órgãos ambientais, como o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

O tratamento de efluentes domésticos envolve operações necessárias a remoção de matéria orgânica e organismos patogênicos. A Tabela 3.4 descreve o tratamento feito em esgotos domésticos indicando para cada nível o poluente a ser removido e as operações necessárias.

Tabela 3.4: Tratamento de esgoto doméstico: níveis, poluentes e operações.

Nível do processo	Poluente a ser removido	Operação
Preliminar	Sólidos em suspensão	Gradeamento Remoção de areia Sedimentação
Primário	Matéria orgânica biodegradável	Lagoas de estabilização e variações Lodos ativados e variações Filtro biológico e variações Tratamento anaeróbio
Secundário	Patogênicos	Lagoas de maturação Disposição no solo Desinfecção com produtos químicos Desinfecção com radiação ultra-violeta
Terciário	Nitrogênio	Nitrificação e desnitrificação biológica Processos físico-químicos
	Fósforo	Remoção biológica Processos físico-químicos

Fonte: adaptado de Sperling (2005)

A etapa **preliminar** do tratamento objetiva apenas remover os sólidos grosseiros presentes e/ou lançados no efluente, tem como finalidade proteger os dispositivos de transporte e promover uma melhor eficiência do sistema de tratamento (SPERLING, 2005). Pode ser feito por meio de gradramento, peneiramento e desarenação.

No gradramento, a remoção dos materiais é feita pela intercalagem de grades. Dependendo do porte das instalações, escolhe-se o espaçamento mais adequado entre as barras, podendo não haver a necessidade de mais de uma grade. As grades, quanto ao seu espaçamento, podem ser assim classificadas como (NUVOLARI, 2003):

- **Grosseiras:** aquelas com espaçamento entre as barras de 4 a 10 cm (usual 7,5 cm).
- **Médias:** aquelas com espaçamento de 2 a 4 cm (usual de 2,5 cm).
- **Finas:** aquelas com espaçamento entre barras de 1 a 2 cm (usual 1,4 ou 1,9 cm).

A limpeza das grades pode ser feita manualmente ou por meio de dispositivos mecânicos.

No peneiramento a remoção dos materiais é feita por peneiras com aberturas que variam de 0,25 a 5,00 mm. Estas são utilizadas para remoção de sólidos muito finos ou fibrosos.

Até a década de 70 do século XX, as peneiras eram utilizadas apenas no tratamento de efluentes industriais, agroalimentares, têxteis, de papel e celulose, de curtumes, químicas e etc.. A evolução para modelos de autolimpeza e grau de mecanização simplificado possibilitou a utilização das peneiras, também, para o esgoto sanitário, principalmente em instalações de condicionamento prévio para lançamentos subaquáticos e para a redução de carga orgânica nas estações de tratamento, possibilitando menores custos e de área para as unidades de tratamento subseqüentes.

A desaneração ocorre com uma caixa de areia, denominada desarenador, cuja finalidade é a de remoção da areia presente no esgoto sanitário. Sempre que

possível, o desarenador deve preceder eventuais unidades de bombeamento, principalmente quando se tratar de bombas centrífugas que podem ser danificadas pela ação abrasiva da areia. Na caixa de areia, procura-se reter as partículas com diâmetro relativo maiores do que 0,2 mm (200 μm), não sendo desejável a retenção de partículas orgânicas sedimentáveis. Após a caixa de areia é comum a instalação de um medidor de vazão que pode ser do tipo vertedor ou tipo calha Parshall. A vazão nos vertedores e na calha Parshall é função direta da altura de água à montante do mesmo, ou seja, o medidor é uma estrutura para controle dessa altura.

A última etapa do tratamento **preliminar** ocorre para a retirada de sólidos não grosseiros em suspensão, os quais podem ser parcialmente removidos em unidades de sedimentação chamados os decantadores. Uma parte significativa destes sólidos em suspensão é compreendida pela matéria orgânica em suspensão e a sua remoção implica na diminuição da carga de DBO dirigida ao tratamento secundário. Antes dos decantadores é comum prever-se um tanque de equalização. Esse tanque deve ser projetado de forma a permitir a alimentação equilibrada das duas ou mais unidades, ou seja, sempre a mesma vazão e pH estabilizado.

No nível **primário** do tratamento, ocorre a remoção da matéria orgânica que se apresenta dissolvida (DBO solúvel). Esta pode ser removida nas lagoas de estabilização, por meio de lodos ativados, sistemas anaeróbios e sistemas anaeróbicos com biofilmes (SPERLING, 2005).

- Lagoas de estabilização

Alternativa de tratamento utilizada para despejos domésticos ou industriais que apresentem grande concentração de matéria orgânica. Como vantagens deste processo citam-se o excelente desempenho quanto à remoção, o baixo custo de implantação e manutenção e a capacidade de trabalhar com sobrecargas hidráulicas e orgânicas. Entretanto o uso de grandes áreas para a implantação torna este sistema uma opção desvantajosa (MEDRI e MEDRI, 2004).

O processo de lagoas de estabilização pode operar como lagoa facultativa (processo aeróbio e anaeróbio em uma mesma lagoa); como lagoa anaeróbia seguido de lagoa facultativa e como lagoa aerada facultativa na qual o oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos, ao invés de através da fotossíntese (SPERLING, 2005).

- Lodo Ativado

O processo de lodo ativado pode ocorrer de três maneiras: convencional, por aeração prolongada e por fluxo intermitente.

No processo *convencional* a concentração de biomassa no reator é bastante elevada, devido à recirculação dos sólidos (bactérias) sedimentados no fundo do decantador secundário. A biomassa permanece mais tempo no sistema do que o líquido, o que garante uma elevada eficiência na remoção da DBO. A operação de lodo ativado *por aeração prolongada* é similar ao sistema anterior, com a diferença de que a biomassa permanece mais tempo no sistema (os tanques de aeração são maiores). E, na operação de lodo ativado por **fluxo intermitente** no mesmo tanque ocorrem, em fases diferentes, as etapas de reação (aeradores ligados) e sedimentação (aeradores desligados). (SPERLING, 2005).

- Sistemas Anaeróbios

Para os sistemas anaeróbios a operação pode ser definida como reator anaeróbio com manta de lodo onde a DBO é estabilizada anaerobicamente por bactérias dispersas no reator. O fluxo do líquido é ascendente. A parte superior do reator é dividida nas zonas de sedimentação e de coleta de gás. Esse sistema ainda pode ser operado por filtro anaeróbio onde a DBO é estabilizada anaerobicamente por bactérias aderidas a um meio suporte (usualmente pedras) no reator. O tanque trabalha submerso e o fluxo é ascendente. O sistema requer decantação primária (freqüentemente fossas sépticas). A produção de lodo é baixa e o mesmo já sai estabilizado (SPERLING, 2005).

- Disposição no Solo

O sistema de tratamento a nível secundário ainda pode ser por disposição no solo através de infiltração lenta, os esgotos são aplicados ao solo, fornecendo água e nutrientes necessários para o crescimento das plantas. Parte do líquido é evaporada, parte percola no solo e a maior parte é absorvida pelas plantas. Essa disposição pode ser através de infiltração rápida, os esgotos são dispostos em bacias rasas. O líquido passa pelo fundo poroso e percola pelo solo. A perda por evaporação é menor, face às maiores taxas de aplicação. A aplicação é intermitente, proporcionando um período de descanso para o solo. Quando esse tipo de tratamento é por escoamento superficial, os esgotos são distribuídos na parte

superior de terrenos com uma certa declividade, através do qual escoam, até serem coletados por valas na parte inferior (SPERLING, 2005).

3.1.3. LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Os processos de tratamento de esgotos geram um resíduo sólido, o lodo, que contém substâncias que, quando dispostas em locais inadequados, são nocivas ao meio ambiente e à saúde humana. Devido a isso, o tratamento e a disposição no ambiente se tornam parte integrante do processo de tratamento de efluentes.

Os lodos provenientes do tratamento de esgoto são classificados como resíduos sólidos pertencentes à Classe II - não perigosos, de acordo com NBR-10004 (ABNT, 2004). Esta norma classifica os resíduos sólidos, com vista no seu gerenciamento, independente da sua destinação final, definindo-os como:

“Resíduos no estado sólido e semi-sólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição que são os resíduos de limpeza pública. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos de instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos e corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.” (ABNT NBR 10004:2004, item 3.1, pág. 1)

Para a classificação dos resíduos sólidos, é necessário a identificação do processo de obtenção ou da atividade que lhe deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicados (ABNT-NBR 10004/2004).

A quantidade de resíduos sólidos gerados, diariamente, vem aumentando gradativamente e sua disposição final tornou-se um principais dos focos de discussão. Os locais para a sua disposição estão se esgotando e medidas

inadequadas são tomadas, tais como a queima do resíduo ou disposição junto a logradouros públicos, terrenos baldios, encostas e cursos de água, contaminando o ambiente e comprometendo a saúde humana (MARCO, 2009).

No Brasil, a legislação em vigor para o gerenciamento de resíduos sólidos foi sancionada em 2 de agosto de 2010, através da Lei nº 12.305/10 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), abordando de forma específica a reciclagem de resíduos sólidos e a coleta seletiva, como sendo necessários ao desenvolvimento e ao consumo sustentável e à preservação do meio ambiente para as presentes e futuras gerações, conforme termos do art. 225 da Constituição Federal.

Para que a legislação se cumpra, antes de se definir o local da estação de tratamento e o destino final do lodo gerado, devem ser estudados os seguintes aspectos: quantidade de produção e caracterização do lodo gerado na estação de tratamento, presença de esgotos industriais no sistema, características especiais que possam vir a interferir na qualidade final, tais como a presença de metais pesados ou tipos de solventes orgânicos (SALVADOR, 2011).

Nos processos de reciclagem do lodo um dos grandes problemas enfrentados é a falta de conhecimento dos sólidos presentes. Esta situação se ameniza quando se foca no lodo de Estação de Tratamento de Esgoto que se constitui por grande quantidade de água que o torna volumoso e de fácil diluição no ambiente. A retirada da umidade do lodo diminui o seu volume e os riscos de contaminação do ambiente. A Figura 3.1 apresenta métodos de redução para o lodo.

O lodo desidratado é formado, principalmente, por matéria orgânica, em percentuais acima de 66%, e compostos inorgânicos, muitas vezes, nocivos como metais pesados (GEYER, 2001).

No nível primário de uma estação de tratamento de esgoto, quando removido do decantador, o lodo apresenta-se com teores de sólidos totais de 1 a 7%, dependendo do tipo de decantador e da forma de remoção do lodo. Já no nível secundário do tratamento, proveniente dos decantadores secundários e descartados dos sistemas de lodos ativados convencionais, o lodo apresenta-se, normalmente, com uma coloração marrom e uma aparência floculenta. Se a cor apresentar-se mais escura, significa que o lodo está se aproximando de condições sépticas. Se a

cor for mais clara, o lodo está fresco e bem aerado. Os lodos provenientes de sistemas de lodos ativados convencionais apresentam teores de sólidos totais na faixa de 0,5 a 1,5% (NUVOLARI, 2003).

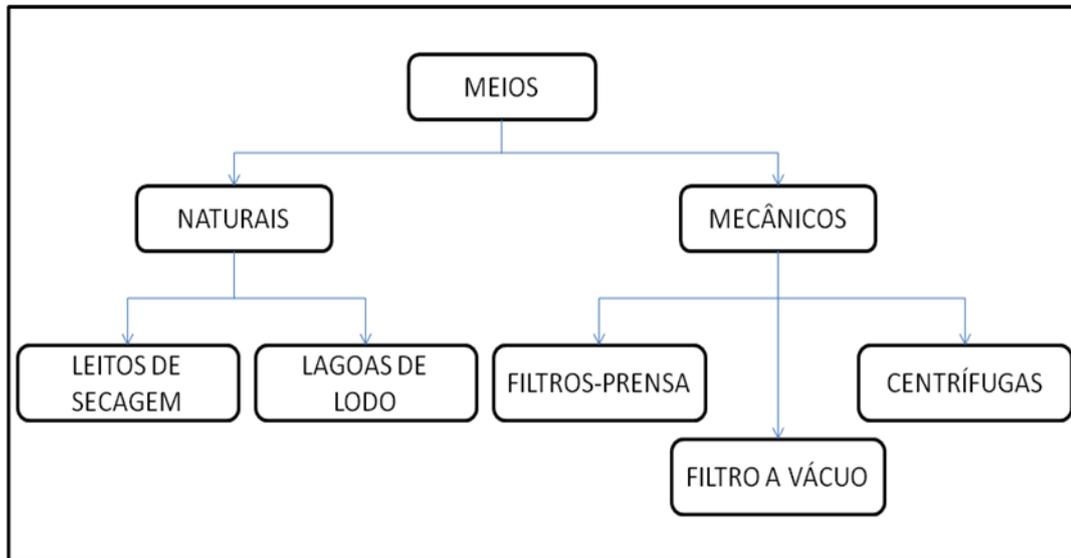


Figura 3.1: Formas de redução de volume de lodo.

Fonte: adaptado de Andreoli *et al.* (2001).

Os sólidos resultantes desse processo podem ser dispostos em aterros ou ser utilizados em sistemas de codisposição com matrizes de cimento ou entulho. Estudos têm sido feitos para essa reutilização (ANDREOLI *et al.*, 2001).

O volume de lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto representa cerca de 1 a 2% do volume de esgoto tratado, sendo que seu tratamento e disposição final podem chegar a atingir entre 30% e 50% do custo operacional de uma ETE (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

3.2. ETE PARQUE MARINHA

A Estação de Tratamento de Esgoto Parque Marinha, gerenciada pela CORSAN, está localizada na Avenida dos Grandes Lagos, no Bairro Parque Marinha, município de Rio Grande- RS, cujas coordenadas geográficas são 32°.6'11.61"S e 52°.11'1.85"O (Figura 3.2). Esta ETE é a fonte de coleta do lodo a

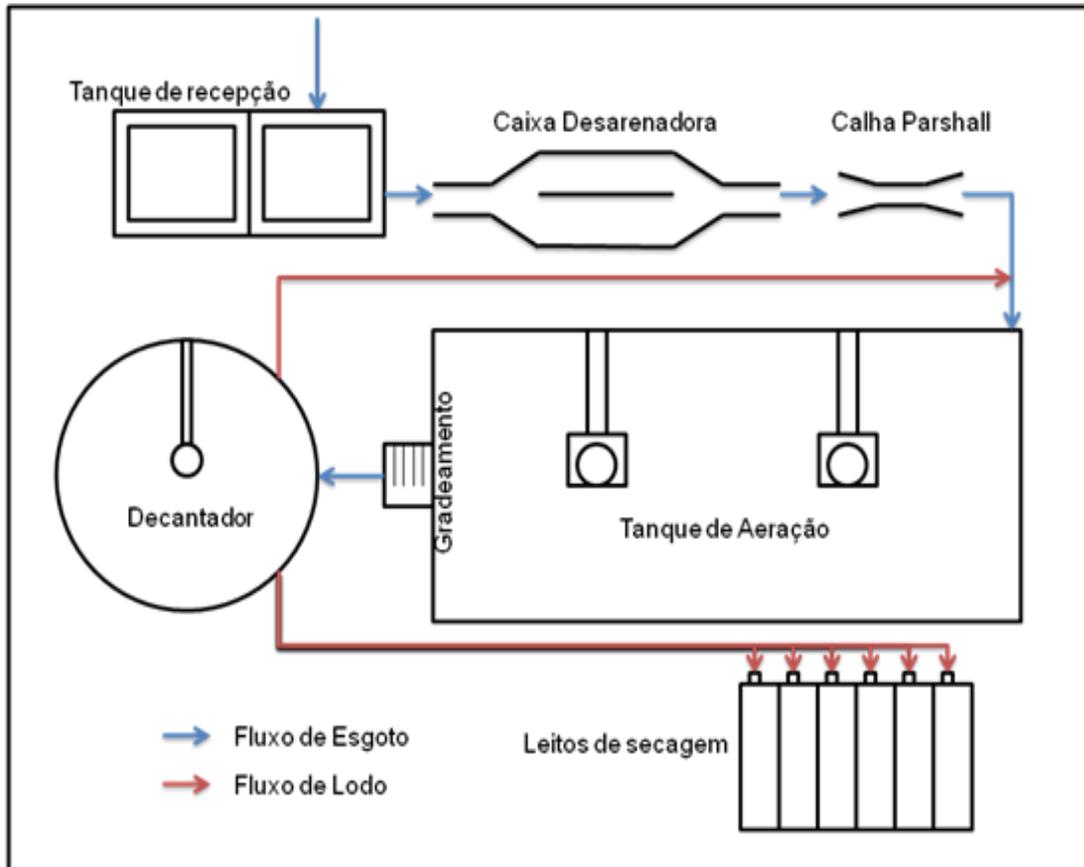


Figura 3.3: Fluxograma do sistema aerado-biológico utilizado na Estação de Tratamento de Esgoto Parque Marinho, Rio Grande/RS.

Os leitos de secagem de lodo possuem dimensões de 6 m x 25 m x 0,60 m (largura, comprimento e altura, respectivamente). O lodo depositado atinge uma altura máxima de 0,45 m. São produzidos mensalmente cerca de 400m³ de lodo úmido.

O efluente líquido tratado da ETE Parque Marinha é lançado, dentro dos padrões estabelecidos pela legislação, no Arroio Vieira (Figura 3.2), distante cerca de 150 metros da Estação de Tratamento.

A estação possui medições e análises periódicas para a verificação dos parâmetros de lançamento de efluentes para sistemas de tratamento de esgotos sanitários. Resultados de análises recentes mostram que o efluente tratado cumpre as exigências estabelecidas, como demonstradas na Tabela 3.5, que apresenta a análise do mês de novembro de 2011.

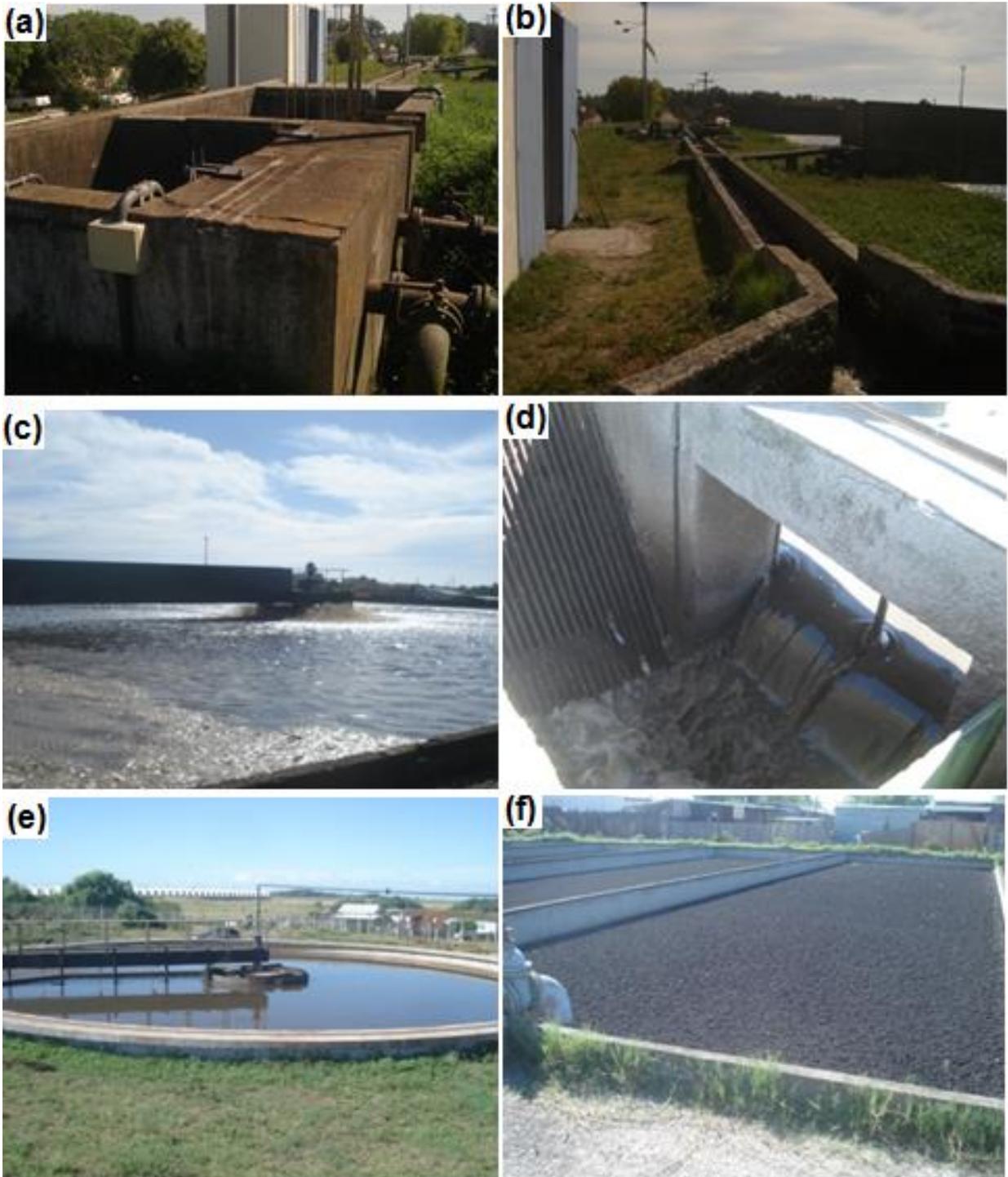


Figura 3.4: Constituintes do sistema aerado-biológico da ETE Parque Marinha, localizada no município de Rio Grande/RS: (a) Tanque de Recepção de esgoto; (b) Caixa Desarenadora; (c) Tanque de Aeração; (d) Gradeamento; (e) Decantador; (f) Leito de Secagem de lodo. Fonte: Fotos do Autor, 2011.

Tabela 3.5 - Análise do efluente tratado da ETE Parque Marinha, Novembro/2011.

Parâmetro	Afluente	Efluente
Sólidos suspensos	280 mg.L-1	59 mg.L-1
Sólidos sedimentáveis	0,8 mL.L-1	0,0 mL.L-1
pH	7,7	7,7
OD	0,0	1,8
N Amoniacal	69 mg Namon.L-1 N	56 mg Namon.L-1 N
P Total	8,34 mg P.L-1	1,58 mg P.L-1
DQO	475 mg O2.L-1	90 mg.L-1
DBO	200 mg.L-1	20 mg.L-1
<i>Col. Termotolerantes</i>	23.000.000	1.400.000
Temp. Amostra	23°C	22°C

Fonte: CORSAN, Novembro de 2011.

3.3. PRODUÇÃO CERÂMICA

A indústria cerâmica brasileira tem participação de cerca de 1% no PIB nacional, sendo aproximadamente 40% desta participação representada pelo setor de cerâmica vermelha. O setor de cerâmica vermelha consome cerca de 70 milhões de toneladas de matérias-primas por ano, através das 12 mil empresas distribuídas pelo país, a maioria de pequeno porte, gerando centenas de milhares de empregos (SANTOS *et al.*, 2005; MACEDO *et al.*, 2008).

3.3.1. ARGILAS

Ferreira (2012) argumenta que as argilas para cerâmica vermelha geralmente são submetidas a temperaturas de queima entre 850 e 950°C, ao passo que as argilas para cerâmica branca podem ser tratadas entre 1050°C e 1250°C. As argilas refratárias, devido às suas peculiaridades, são tratadas a temperaturas próximas a 1450°C. Ainda, difere a cerâmica vermelha das demais devido a sua coloração mais escura após o processo de queima.

A matéria-prima da indústria cerâmica é um material muito heterogêneo, cujas características dependem da sua formação geológica e da localização da extração (MACEDO *et al.*, 2008).

Conceitualmente, argilas são materiais naturais, terrosos, de granulação fina (partículas com diâmetro geralmente inferior a 2 μm) e formadas quimicamente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. São constituídas por partículas cristalinas extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos como argilominerais. Uma argila qualquer pode ser composta por um único argilomineral ou por uma mistura deles. Além dos argilominerais, as argilas podem conter ainda outros minerais, não cristalinos ou amorfos, matéria orgânica e impurezas. Os Elementos mais freqüentes são: oxigênio (O), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na) (NÓBREGA *et al.*, 2011; GONÇALVES, 2008).

Como análise dos elementos na massa cerâmica, Júnior (2008), cita, que alto teor de SiO_2 (acima de 70%) nas argilas pode estar associado a uma grande quantidade de sílica livre na forma de quartzo, que é um agente desplastificante. Altos teores de alumínio invariavelmente indicam caulinita como principal argilomineral, interessantes para a fabricação de material refratários. K_2O é um agente fundente que atua na melhora da vitrificação, e ainda, teores elevados de Fe levam a uma cor pós-queima mais escura, como na cerâmica vermelha. Menores teores a cor de queima mais clara.

Quanto à plasticidade, ela é adquirida quando umedecida, podendo a argila ser agrupada em dois grupos: argilas plásticas e argilas não plásticas (GONÇALVES, 2008). As argilas plásticas são essenciais na fase de conformação (MORAIS, 2011).

3.3.2. PROCESSAMENTO CERÂMICO

O processamento e as características finais do material cerâmico dependem em um primeiro momento da composição da argila em argilominerais. Para a fabricação de um produto cerâmico, as etapas podem ser definidas como a extração e o preparo da argila na natureza, formação da massa cerâmica, prensagem,

secagem e queima (Figura 3.5) (KAZMIERCZAK, 2007; JUNIOR, 2008; CALLISTER, 2009).

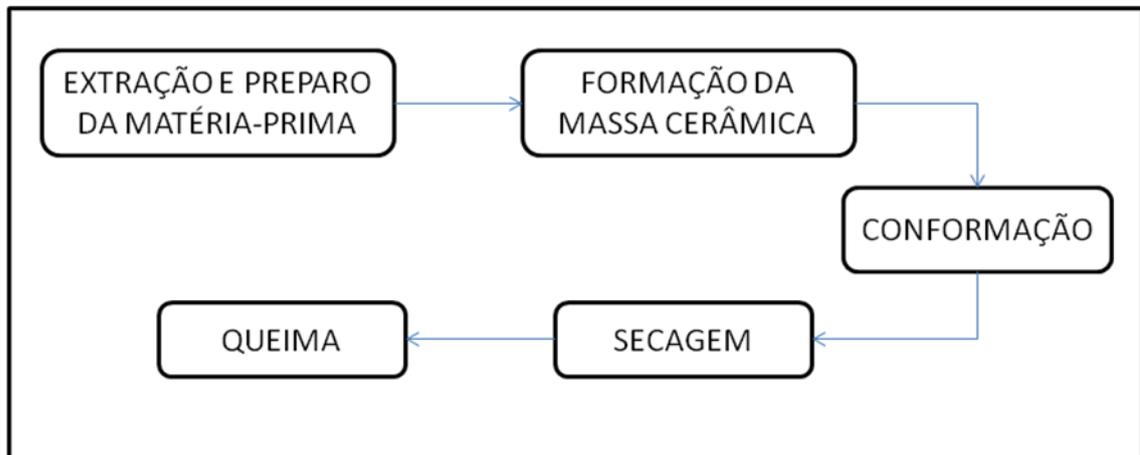


Figura 3.5: Fluxograma da produção de material cerâmico.

Fonte: Adaptado de Kazmierczak (2007).

A extração da argila é realizada com o uso de retroescavadeiras, pás carregadeiras e tratores de esteiras, o transporte é feito através de caminhões até o depósito. As etapas de mistura e homogeneização têm a finalidade de adequar a dimensão dos grãos de argila ao processo de moldagem, aumentar a reatividade e reduzir o teor de impurezas (KAZMIERCZAK, 2007; JUNIOR, 2008).

3.3.2.1. FORMULAÇÃO

Na formulação da massa cerâmica, a matéria-prima sofre diversas transformações físico-químicas até o produto final. Ocorre a mistura de duas ou mais argilas, visto que muitas vezes somente uma argila pode não atingir todas as características desejáveis (JUNIOR, 2008).

A água é acrescentada para que se alcance uma plasticidade desejável que é o grau de compactabilidade das matérias primas, necessária na moldagem das massas cerâmicas. A compactação do material depende da relação água/argila que permite as partículas se aproximarem resultante de forças de atração.

Santos (1975) *apud* Pureza (2004) expõe que a plasticidade é a propriedade que um sistema possui de se deformar pela aplicação de uma força e de manter essa deformação quando a força aplicada é retirada.

3.3.2.2. CONFORMAÇÃO

Existem diversos processos para dar forma às peças cerâmicas, e a seleção de um deles depende fundamentalmente de fatores econômicos, da geometria e das características do produto (ABCERAM, 2013).

A conformação por prensagem é feita com a massa cerâmica, contendo algum elemento aglutinante e é compactada mediante pressão, onde o grau de compactação da argila é função da distribuição do tamanho de partículas (CALLISTER, 2009).

O material é colocado a uma matriz de prensagem para compactação, no qual já foi acrescentado água ou aditivos que auxiliam sua densificação. Com a característica de rápida conformação, esse processo possui vantagens de alta produtividade e de um material conformado com alta precisão dimensional.

A umidade do material para prensagem deve se aproximar de 7%, com isso permite que o material permaneça constante nas suas dimensões, significando uma maior densificação do material e influenciando nas etapas seguintes no qual as peças conformadas serão manipuladas ou submetidas a tensões (PUREZA, 2004).

3.3.2.3. SECAGEM

A secagem após a prensagem é para a retirada da água utilizada como material aglutinante. Nesta etapa, o produto cerâmico contém de 7 a 30% de umidade, dependendo do sistema de conformação (ROSA, 2010; SINDICER, 2008). Com o material ainda altamente poroso, a água do interior do material deve migrar para a superfície que com o aquecimento faz com que esse processo seja acelerado e o material torna-se rígido e consistente (GONÇALVES, 2008).

A secagem pode ser de duas formas, natural ou artificial. Em uma pesquisa realizada pelo Sindicato da Indústria Cerâmica (SINDICER), em 2008, mostrou que a secagem natural era, até então, a mais utilizada (Tabela 3.6).

Tabela 3.6: Tipo de secagem praticada pela indústria de materiais cerâmicos.

Tipo de secagem	Nº de respostas	%
Natural	730	86,7
Artificial, com secador de câmara	57	6,7
Artificial, com secador túnel	50	6,0
Secagem sobre o(s) forno(s)	5	0,6
Total	842	100,0

Fonte: SINDICER, 2008.

Para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água, de forma lenta e gradual, em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50 °C e 150 °C (ABCERAM, 2013).

Segundo Vicenzi (1999) *apud* Pureza (2004), está é uma etapa fundamental no processamento cerâmico, pois na etapa de queima, ao elevar a temperatura rapidamente com as peças introduzidas no forno, ainda úmidas, leva a uma deterioração da resistência, por fissuras, trincas e até explosões.

À medida que a água é eliminada gradativamente do interior da peça, as partículas vão se acomodando de modo a produzir uma retração em velocidade menor que a expulsão da água, até que seja alcançada a retração máxima. Quando essa contração acaba, o resto de água pode ser eliminado sem riscos de defeitos posteriores.

3.3.2.4. QUEIMA

Durante esse tratamento ocorre uma série de transformações em função dos componentes da massa, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações.

O material livre de umidade é submetido à queima. Nessa operação, conhecida também por sinterização, os produtos adquirem suas propriedades finais. As peças, após secagem, são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se entre 800 °C a 1700 °C.

Nesta fase do processo, o corpo cerâmico sofre contração volumétrica e redução em sua porosidade, fazendo com que se torne um material mais denso e de maior resistência mecânica. O aumento da densidade do material é resultante da sinterização que é um processo na qual as pequenas partículas do material se ligam entre si por vitrificação, transformando o material compacto poroso em num produto resistente e denso (GONÇALVES, 2008).

A sinterização pode ocorrer por fase vítrea, na queima de materiais contendo silicatos, atingindo seu ponto de fusão formam um líquido bastante viscoso, formando uma ligação vítrea muito resistente, promovendo uma densificação mais rápida em temperatura mais baixa, ou uma sinterização por fase sólida, no qual a densificação ocorre da difusão atômica dos átomos, as regiões de real contato entre as partículas aumentam formando uma interface chamada de contorno de grão, ocorrendo de forma mais rápida em temperaturas mais altas (SILVA, 2010).

A queima pode ser dividida nas etapas de desidratação, por perda da água de umidade e da água estrutural dos argilominerais a uma temperatura até por volta de 400°C. A seguir, ocorre a decomposição da matéria orgânica e a oxidação do óxido ferroso, passando a férrico e; vitrificação, próximo a 900°C.

Segundo Pedrassani (2001) *apud* Pureza (2004), as transformações no processo de queima, também podem, assim ser observadas:

- i) Até 200°C: eliminação da água higroscópica ou residual e da água interfoliar ou zeolítica;

- ii) De 350° a 650°C: combustão das substâncias orgânicas e dissociação dos sulfetos com liberação de CO₂ e SO₂;
- iii) De 600° a 800°C: colapso do retículo dos argilominerais com liberação da água de constituição;
- iv) De 800° a 950°C: decomposição dos carbonatos com liberação de CO₂;
- v) De 900° a 1000°C: reações da sílica e da alumina com outros elementos, e formação de silicoaluminatos complexos que conferem ao corpo cerâmico as propriedades físico-mecânicas características;
- vi) Acima de 1000°C: amolecimento e fusão dos silicoaluminatos com formação de uma fase vítrea que, englobando as partículas menos fusíveis, confere ao corpo cerâmico, dureza, compactação, impermeabilidade e resistência mecânica características.

O comportamento durante a queima define uma série de transformações em função dos componentes da massa, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações (ABCERAM, 2013).

Os produtos, após a etapa de queima, são enviados ao consumo, entretanto, alguns necessitam passar por outra etapa, a de acabamento, no qual podem ser adicionados esmaltes ou ocorrer algumas mudanças na característica física como corte e furação.

Os produtos cerâmicos devem seguir as normas de regulamentação para diversas aplicações tecnológicas. Isso faz com que o consumidor tenha a garantia de um produto de qualidade e as indústrias cerâmicas sigam um padrão de produção, com isso aumentando a sua competitividade no mercado.

3.4. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS À MASSA CERÂMICA

Pelo seu elevado volume de produção, o que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos, a indústria cerâmica é uma das que mais se destacam na reciclagem de resíduos industriais e urbanos. Essa incorporação de resíduos traz diversas vantagens para a indústria, como a economia de matéria-prima não-renovável, obtenção de produtos com forte apelo ambiental e redução do consumo de energia (LUCAS e BENATTI, 2008).

A caracterização do lodo de esgoto de Estação de Tratamento de Água (ETA) demonstra a possibilidade de incorporação destes resíduos na massa cerâmica. Os lodos apresentam componentes interessantes (argilominerais) e prejudiciais (material orgânico e umidade elevada) à massa cerâmica em quantidades excessivas. A incorporação do lodo é realizada na preparação da massa cerâmica, isto é, na mistura para a formação da massa cerâmica a ser conformada. Uma das vantagens dessa incorporação é o ajuste da umidade da massa. A quantidade do resíduo incorporado à matéria-prima varia em função do tipo de resíduo e do processo que está sendo utilizado.

O potencial de incorporação de lodo nas formulações de cerâmicas tradicionais, aliado às elevadas quantidades de recursos naturais consumidos a cada dia por esse segmento industrial, ressaltam a importância da reutilização destes como matérias-primas cerâmicas alternativas, racionalizando o uso dos recursos naturais (TORRES *et al.*, 2004)

Segundo Bersch (2011), no Brasil existem muitos estudos que avaliam a incorporação de resíduos em materiais cerâmicos, os quais se utilizam diversos ensaios na avaliação técnica do produto final.

Silva (2010) investigou a incorporação de um resíduo da indústria petroquímica de rerrefino de óleos minerais e argila contaminada com hidrocarbonetos. O resíduo foi utilizado nas proporções de 0, 3, 5, 10, 15% em peso e os corpos cerâmicos queimados nas temperaturas de 1000°C, 1050°C, 1000°C e 1150°C. Como resultado, a incorporação de resíduo na massa cerâmica levou. À obtenção de produtos cerâmicos tradicionais como previsto em normas técnicas para sua utilização na construção civil.

Gouveia e Sposto (2009) estudaram as propriedades físico-mecânicas de massas cerâmicas com a incorporação de chamote, visando à utilização na produção de blocos cerâmicos. Foram confeccionados corpos cerâmicos nas proporções de 5, 10, 15, 20% em peso de chamote e a queima foi realizada a 850, 950 e 1050°C. Como resultados, a incorporação desse resíduo aumentou as taxas de absorção de água e diminuição da retração linear e para temperatura de 1050°C com 10% de resíduo, os corpos cerâmicos apresentaram melhores resultados para tensão de ruptura à flexão.

Collatto *et al.* (2008) avaliou a adição do resíduo de celulose à argila para processamento cerâmico tradicional. O resíduo foi adicionado à massa com 0, 5, 10, 20, 40% em peso e os cerâmicos foram queimados a 850, 900, 950 e 1000°C. Com este estudo, concluiu-se que se torna desnecessário o processo de beneficiamento do resíduo para uso na produção de cerâmica vermelha.

Ferreira (2012) verificou a potencialidade de uso de resíduos industriais como pó de pedra do beneficiamento de granito, cinza de caldeira de biomassa e lodo de ETE da fabricação de papel e celulose, na fabricação de blocos de vedação. Os resíduos foram adicionados, separadamente com 10, 20 e 30% em peso e os corpos cerâmicos queimados a 850°C e 950°C. Como resultado, apenas o resíduos de pó de pedra possui potencial de uso na fabricação de blocos de vedação e todas as misturas não apresentaram grau de periculosidade no ponto de vista ambiental.

Pinheiro *et al.* (2008) avaliou a incorporação de até 10% de resíduo proveniente da produção de papel nas propriedades e na microestrutura de uma massa cerâmica argilosa utilizada para a fabricação de blocos de vedação. Os corpos cerâmicos foram obtidos através de prensagem a 20 MPa, queimados a 750°C e caracterizados por retração linear, absorção de água e tensão de ruptura à flexão. A microestrutura foi analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Como resultado, constatou que para formulação acima de 5% de resíduo adicionado pode causar efeito deletério para absorção de água e tensão de ruptura à flexão, entretanto a formulação de 3% se mostrou viável tecnicamente como um destino final para o resíduo da produção de papel.

Nos processos de adição de resíduos ao processamento cerâmico, a fase de queima é fundamental para a consolidação das partículas, pois é nesta que se

promove a volatilização de compostos perigosos, as mudanças nas características químicas dos materiais e a imobilização de elementos potencialmente tóxicos e perigosos por meio de fixação na fase vítrea (TELOEKEN *et al.*, 2011)

O uso do lodo de ETE como matéria-prima adicionada à argila e ou massas cerâmicas propicia uma destinação adequada a esse resíduo e à imobilização no corpo cerâmico dos elementos nocivos presentes. As pesquisas que envolvem este tipo de resíduo, além dos testes convencionais de análise física e comportamento mecânico, devem investigar a possibilidade de migração dos elementos nocivos para o meio ambiente.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4.1 apresenta a sequência de etapas da parte experimental desenvolvida neste trabalho.

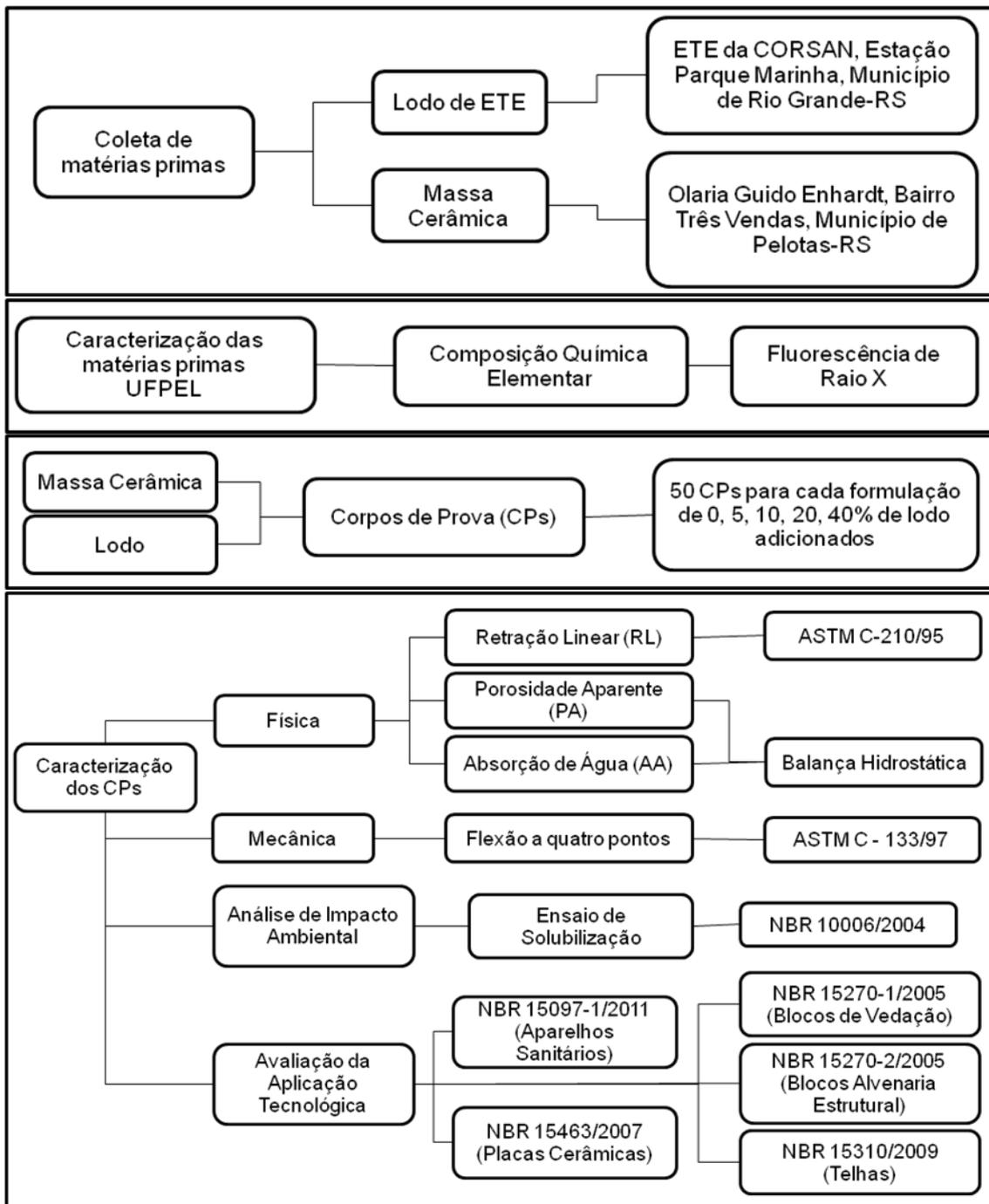


Figura 4.1 Fluxograma representativo das etapas da parte experimental desenvolvida neste trabalho.

4.1 MATERIAS-PRIMAS

4.1.1 MASSA CERÂMICA

A massa cerâmica utilizada neste trabalho foi fornecida pela Olaria Guido Einhardt, localizada no município de Pelotas, RS. Para o estudo, uma amostra foi retirada do processo produtivo de blocos cerâmicos, antes da etapa de secagem. Para a sua caracterização, inicialmente, fez-se a secagem em uma estufa a temperatura de 105°C, por 24 horas. Posteriormente, o material foi moído em um moinho de bolas por 90 min e, após, foi colocado por 30 minutos em moinho planetário, para reduzir a uma granulometria passante na peneira #80 (tamanho de partícula menor que 0,180µm). O processo de moagem se repete até a passagem de todo o material pela malha da peneira utilizada.

Após moagem, fez-se a determinação da composição química da massa cerâmica por fluorescência de raios-X em um equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. A Tabela 4.1 apresenta a composição química da massa cerâmica utilizada.

Tabela 4.1: Composição química por fluorescência de raios X da massa cerâmica utilizada neste trabalho.

	Si	Al	Fe	K	Ti	Ca	S	Zn	Mn
Massa cerâmica	64,71	14,98	10,61	6,48	1,68	0,78	0,15	0,03	0,16

4.1.2 LODO DE ETE

O lodo utilizado neste trabalho foi o fornecido pela estação de tratamento de esgoto da CORSAN, localizada no bairro Parque Marinha, na Avenida dos Grandes Lagos. A amostra de lodo utilizada no desenvolvimento do trabalho foi coletada no dia 6 de janeiro de 2013. Para a sua coleta utilizou-se uma pá e uma caixa plástica com tampa (Figura 4.2). A amostra foi transportada na referida caixa plástica até o Laboratório de Materiais Cerâmicos da Escola de Engenharia da Universidade

Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre, para a caracterização e utilização.



Figura 4.2: Coleta do lodo no leito de secagem da ETE Parque Marinha, Rio Grande/RS.

O lodo coletado, inicialmente, foi seco em estufa a 105°C durante 24 horas. Posteriormente, foi feita a moagem do mesmo em um moinho planetário, por 15 minutos, e, após, o peneiramento em uma peneira 80# (tamanho de partícula menor que 0,180µm). O processo de moagem e peneiramento se sucedeu até que toda a totalidade do material fosse passante na peneira.

O lodo de ETE também foi caracterizado quanto a composição química por fluorescência de raios-X, utilizando-se o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.2: Composição química por fluorescência de raios-X do lodo de ETE utilizado neste trabalho.

	Si	Al	Fe	K	Ti	Ca	S	P	Zn	Mn	Cu	P.F.
Lodo	14,51	5,07	23,28	4,46	3,17	25,35	6,27	11,60	2,99	0,94	0,45	80

Para a determinação da temperatura de eliminação da umidade higroscópica e da matéria orgânica presentes no lodo utilizado, uma amostra do lodo foi submetida à análise termogravimétrica (ATG), com taxa de aquecimento de 2,5°C/min, em um equipamento METTLER-TOLEDO SDTA851E, Software STARE VERSÃO 9. O resultado é apresentado na Figura 4.3.

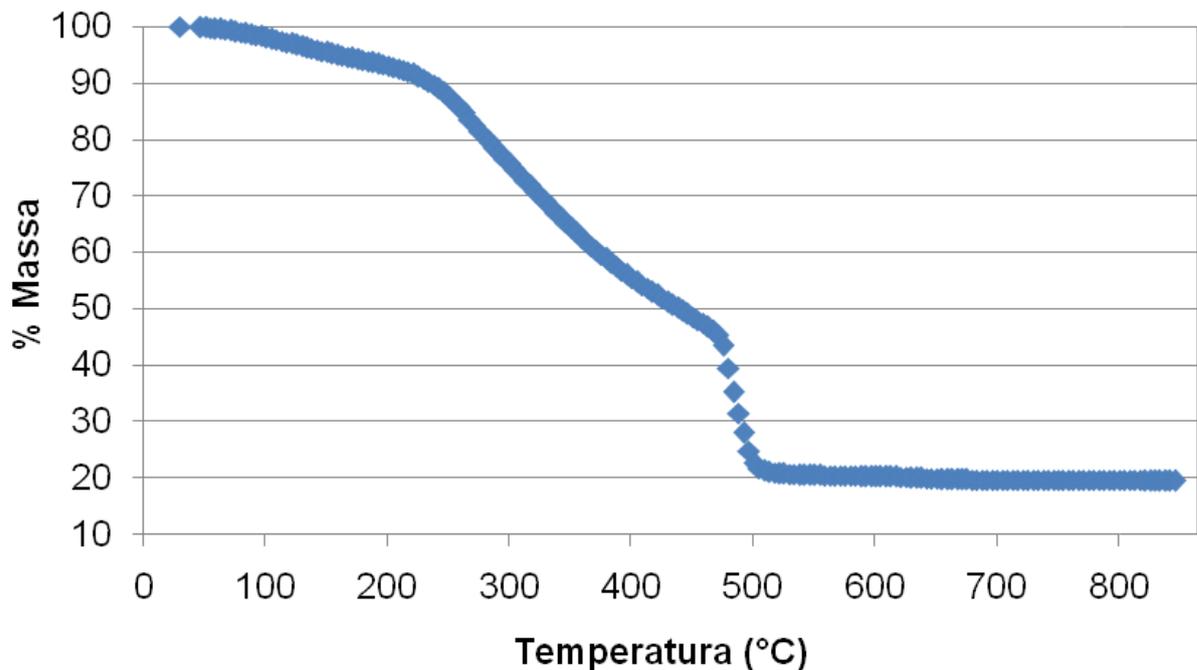


Figura 4.3: Análise termogravimétrica (ATG) do lodo de ETE.

Como a Figura 4.3 indica, o lodo tem uma substancial perda de massa (cerca de 80%), até a temperatura de 500°C, decorrente possivelmente da eliminação da umidade higroscópica e da matéria orgânica. Esta suposição é reforçada no gráfico de análise térmica diferencial (ATD) apresentado na Figura 4.4, obtido em função da temperatura e da energia liberada, onde se constata uma significativa liberação de energia que pode ser associada à combustão da matéria carbonosa presente no lodo.

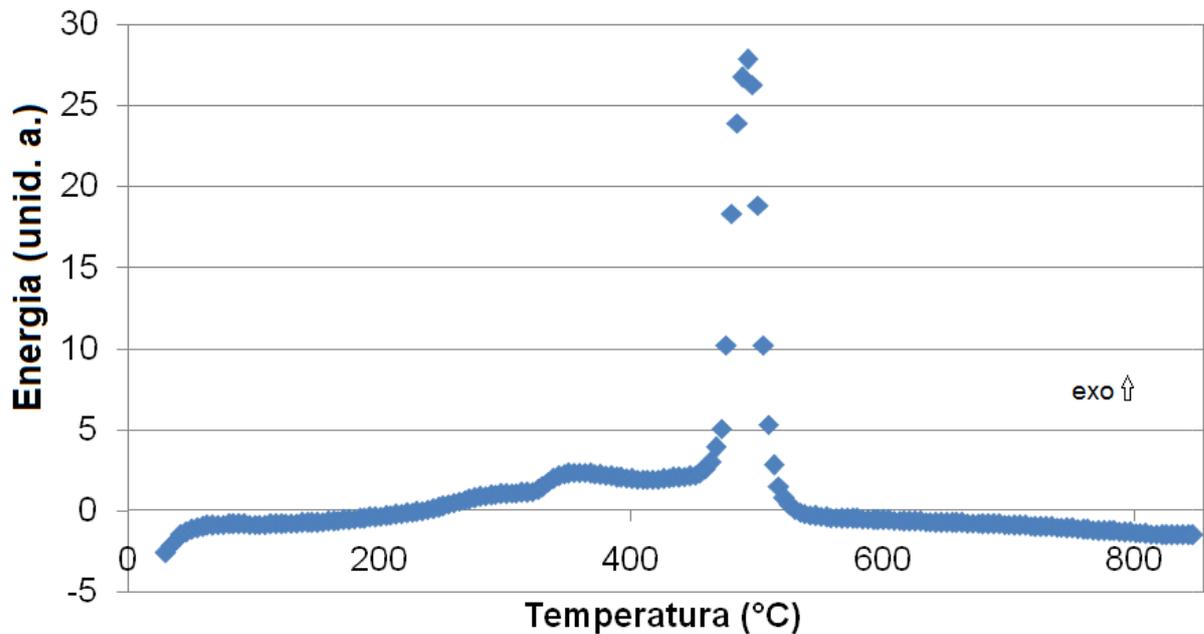


Figura 4.4: Análise térmica diferencial (ATD) do lodo de ETE.

4.2 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a obtenção dos corpos-de-prova foram utilizadas formulações com 0, 5, 10, 20 e 40%, em peso, de lodo de ETE adicionado à massa cerâmica. A preparação dos corpos cerâmicos, nas suas formulações, obedeceu à seguinte sequência:

- i) Formulação de 200g (massa cerâmica + teor da adição de lodo), na proporção de cada formulação;
- ii) Homogeneização em moinho de bolas por 5 minutos;
- iii) Adição de 20ml de água.

Após a homogeneização da mistura, os corpos-de-prova foram conformados por prensagem uniaxial com uma pressão de 20MPa, utilizando uma prensa hidráulica. Foram produzidos 50 corpos-de-prova de cada formulação investigada, nas dimensões 20 x 60 x 10 mm³. A Figura 4.5 apresenta imagens da prensa utilizada e de um corpo-de-prova após prensagem.

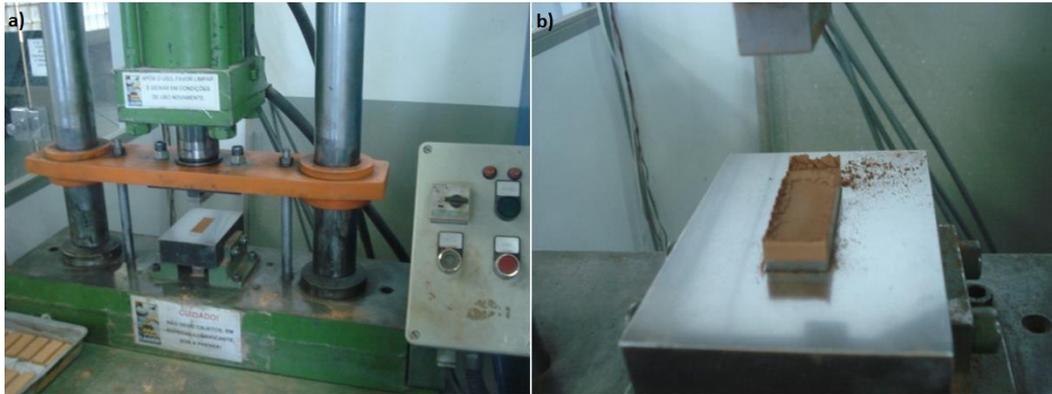


Figura 4.5: a) Prensa utilizada na prensagem dos corpos-de-prova; b) corpo-de-prova logo após prensagem.

Os corpos-de-prova prensados foram secos em estufa por 24 horas a uma temperatura de 105°C. Após secagem os mesmos foram medidos com um paquímetro digital e queimados em um forno elétrico tipo mufla, nas temperaturas de 850, 900, 950, 1000, 1050°C. A curva de queima para todas as temperaturas investigadas obedeceu um taxa de aquecimento de 2,5°C/min e o tempo de patamar foi de 1 hora. Para cada temperatura foram queimados 10 corpos-de-prova por formulação. Após queima, os corpos-de-prova foram, novamente, medidos com um paquímetro digital.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS

Após a queima, os corpos-de-prova foram caracterizados quanto à retração linear, porosidade, absorção de água, resistência mecânica e quanto aos aspectos ambientais e aplicação tecnológica. Para cada ensaio, foram utilizados 10 corpos-de-prova, em média.

4.3.1 RETRAÇÃO LINEAR

A retração linear foi determinada segundo a norma técnica ASTM C-210/95. O ensaio de retração linear relaciona as amostras secas e queimadas através o percentual de retração conforme Equação 4.1.

$$\%Rq = \frac{C_s - C_q}{C_s} \times 100 \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde:

Rq : Retração após queima (%)

Cs : Comprimento seco a 110°C (mm)

Cq : Comprimento após queima (mm)

4.3.2 POROSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA

A porosidade aparente e a absorção de água foram determinadas pelo método da balança hidrostática, sendo calculadas segundo as Equações 4.2 e 4.3, respectivamente.

$$\% PA = \frac{PU - PS}{PU - PI} \times 100 \quad (\text{Equação 4.2})$$

onde:

PA : Porosidade Aparente (%)

PU : Peso Úmido (g)

PS : Peso Seco (g)

PI : Peso Imerso (g)

$$\% AA = \frac{PU - PS}{PS} \times 100 \quad (\text{Equação 4.3})$$

onde:

AA : Absorção de Água (%)

PU : Peso Úmido

PS : Peso Seco

4.3.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência mecânica dos corpos cerâmicos foi determinada pelo ensaio de resistência à flexão a 4 pontos, de acordo com a norma ASTM C-133/97. Para tanto, foi utilizada uma máquina universal, marca SHIMADZU, e o *software* TRAPEZIUMX.

A Figura 4.6 apresenta, esquematicamente, a disposição do corpo-de-prova no ensaio mecânico de resistência à flexão a quatro pontos, onde l é distância dos apoios superiores (15 mm); L é a distância dos apoios inferiores (30 mm), d é a

altura e b é a largura do corpo-de-prova. A Figura 4.7 apresenta o posicionamento do corpo-de-prova para o ensaio de flexão a quatro pontos.

Para o cálculo da resistência à flexão a 4 pontos (σ) foi utilizada a Equação 4.4.

$$\sigma = \frac{3}{2} * \frac{P * (L - l)}{b * d^2} \quad \text{Equação (4.4)}$$

onde:

σ = tensão máxima de ruptura (MPa);

P = carga máxima aplicada (N);

b = base do corpo-de-prova (mm);

d = altura do corpo-de-prova (mm);

l = distância entre os apoios superiores (mm);

L = distância entre os apoios inferiores (mm).

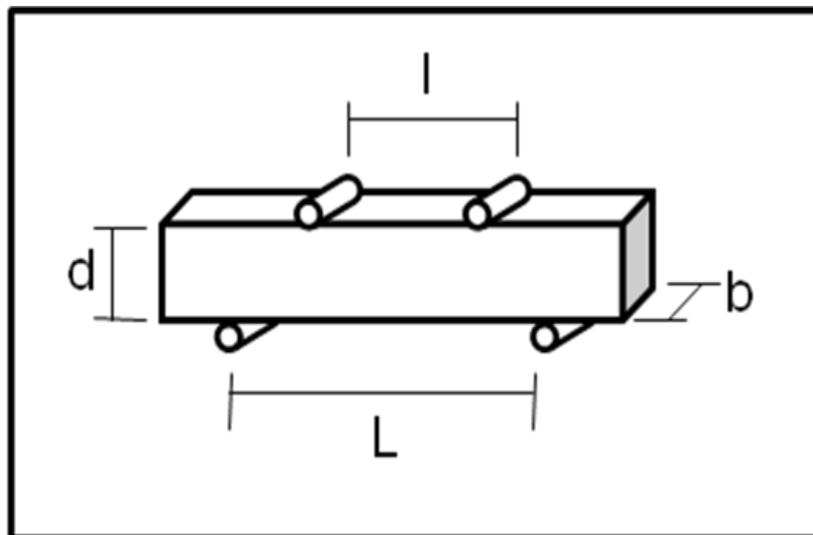


Figura 4.6: Disposição do corpo-de-prova no ensaio de resistência à flexão a 4 pontos.

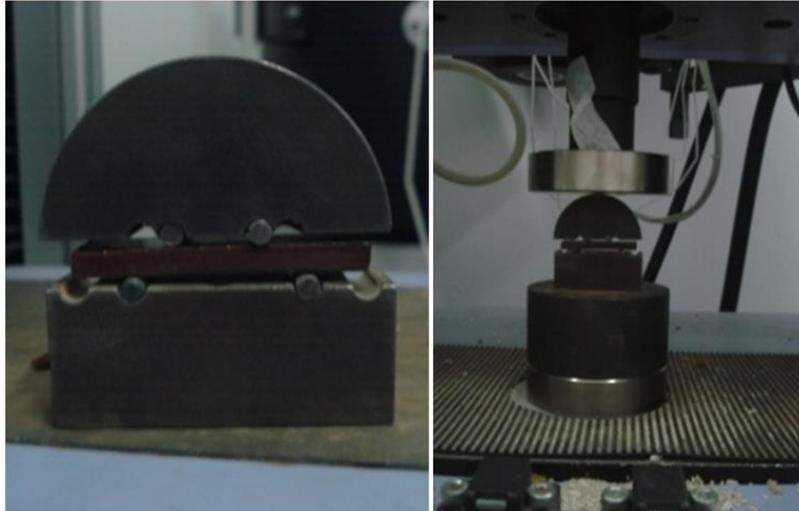


Figura 4.7: Posicionamento do corpo-de-prova para o ensaio de flexão a quatro pontos na máquina de ensaio universal da marca SHIMADZU.

4.3.4 IMPACTO AMBIENTAL

A análise de impacto ambiental dos corpos cerâmicos foi realizada segundo as normas brasileiras NBR 10005/2004, lixiviação de resíduos sólidos, e NBR10006/2004, solubilização de resíduos sólidos.

Com as formulações com adição de lodo que obtiveram resultados satisfatórios na caracterização física para aplicação tecnológica, foram confeccionados corpos-de-prova em forma de cubos com cerca de $9,5 \times 9,5 \times 9,5 \text{mm}^3$. Os resultados dos extratos foram classificados de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

4.3.5 AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO TECNOLÓGICA

Quanto a sua utilização como produto comercial para uso na construção civil, os valores de absorção de água e resistência mecânica foram comparados aos das as normas brasileiras NBR 15097-1/2011 para aparelhos sanitários, NBR 15463/2007 para placas cerâmicas para revestimento, NBR 15270-1/2005 para blocos cerâmicos de vedação, NBR 15270-2/2005 para blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e NBR 15310/2009 para telhas cerâmicas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de caracterização analisados neste capítulo estão apresentados na forma de imagens e gráficos. Os valores obtidos em cada ensaio, bem como, a média e o desvio padrão estão apresentados no Anexo I, II, III e IV deste trabalho.

5.1 COR DE QUEIMA

A Figura 5.1 apresenta a influência da quantidade de lodo de ETE adicionados, na variação da cor de queima dos corpos cerâmicos em função da temperatura.

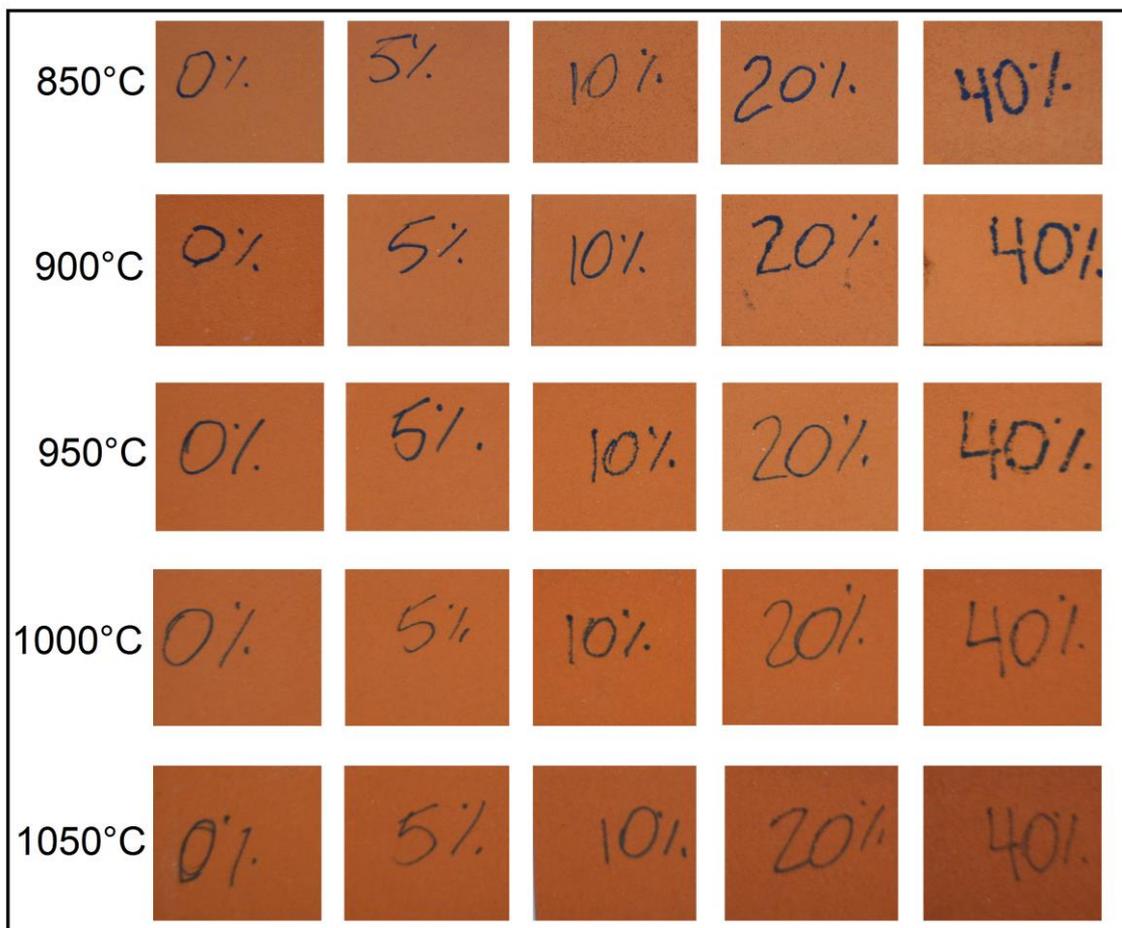


Figura 5.1: Variação da cor de queima dos corpos de prova em função da temperatura de queima e da quantidade de lodo na sua formulação.

A análise comparativa das imagens da Figura 4.3 não possibilitou identificar significativa influência do teor do resíduo na tonalidade do produto cerâmico e mostrou que os corpos de prova apresentam homogeneidade na coloração, isto é, sem manchamento pela maior concentração do resíduo da ETE. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por outros pesquisadores, tais como Vicenzi (1999) e Pureza (2004).

5.2 RETRAÇÃO LINEAR, POROSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA

As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, a variação da retração linear, a porosidade aparente e absorção de água dos corpos de prova obtidos em função da temperatura de queima e da quantidade de lodo na formulação.

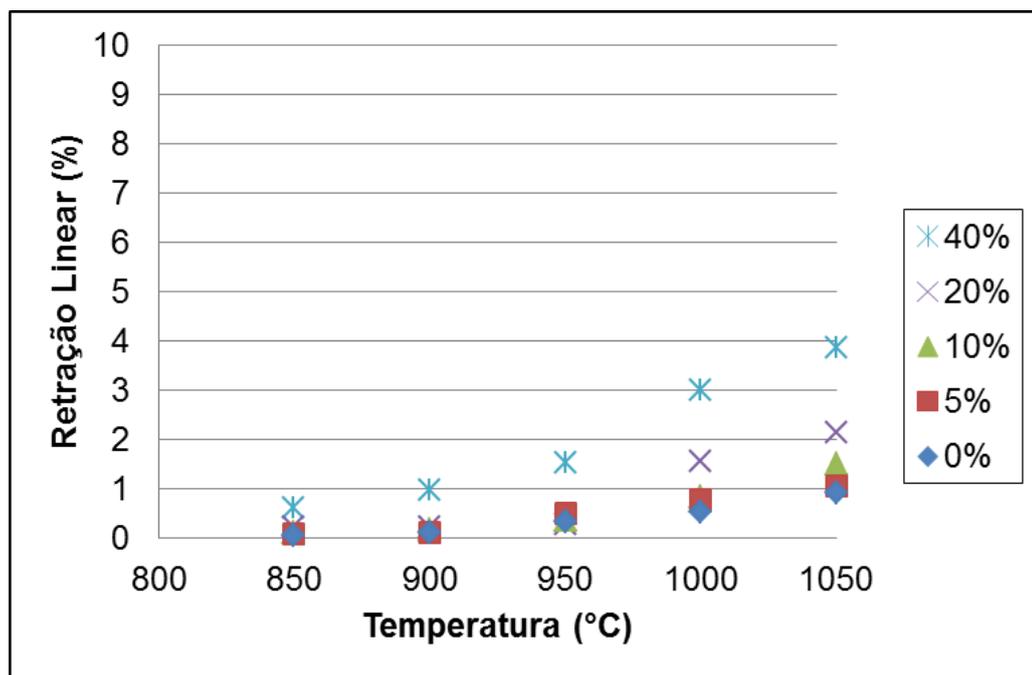


Figura 5.2: Retração linear de corpos de prova de massa cerâmica pura e aditivada com lodo de ETE, em função da temperatura de queima e da quantidade de lodo adicionada.

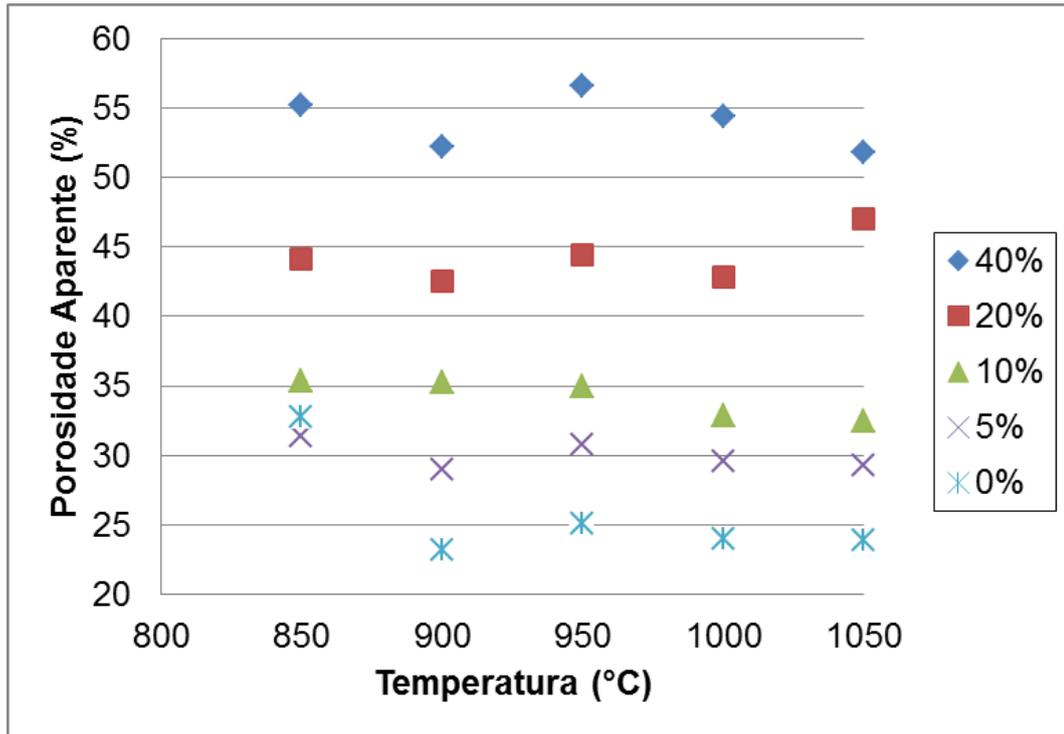


Figura 5.3: Porosidade Aparente de corpos de prova de massa cerâmica pura e aditivada com lodo de ETE, em função da temperatura de queima e da quantidade de lodo adicionada.

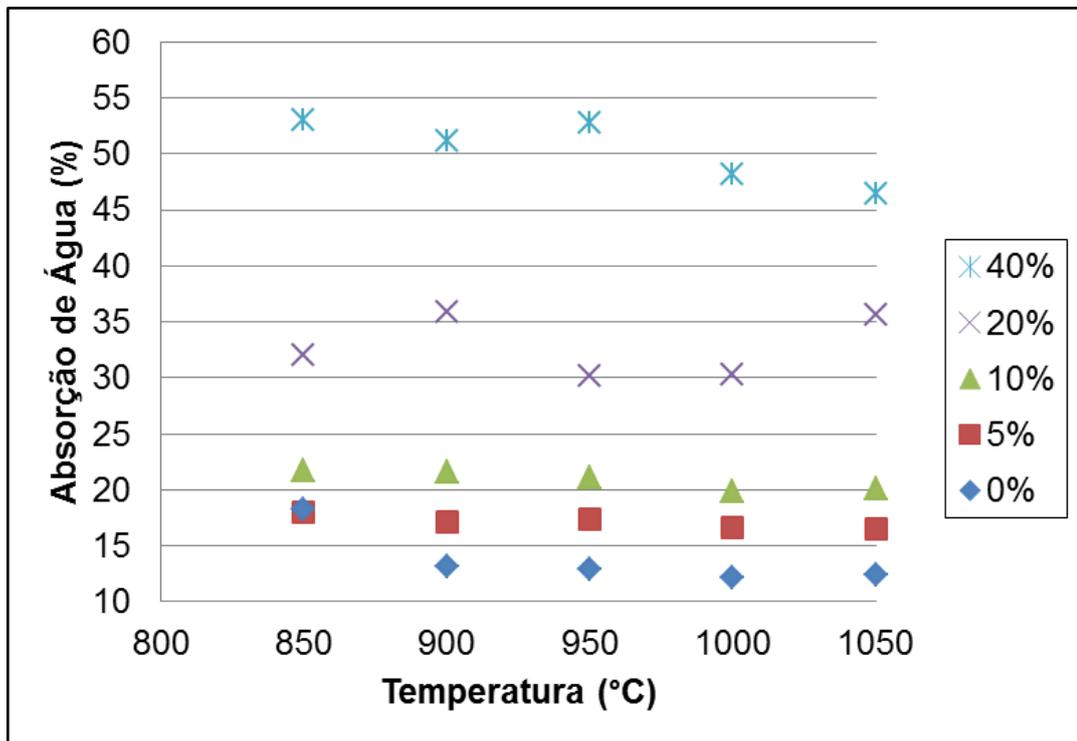


Figura 5.4: Absorção de água dos corpos de prova de massa cerâmica pura e aditivada com lodo de ETE, em função da temperatura de queima e da quantidade de lodo adicionada.

Como pode-se ver na Figura 5.2, em comparação a massa cerâmica pura (sem lodo), os resultados do gráfico mostram que a retração dos corpos cerâmicos aditivados com lodo foi pequena, menor que 3%, e diretamente proporcional a quantidade de lodo adicionada e ao aumento da temperatura de queima.

Assim, seria de se esperar que a maior retração linear acarretasse na menor porosidade aparente e na menor absorção de água. No entanto, pelos gráficos das Figuras 5.3 e 5.4, que apresentam respectivamente resultados da variação da porosidade aparente e da absorção de água, essa relação não é tão evidente, exceto para a formulação sem lodo, na qual o corpo cerâmico apresentou diminuição da porosidade aparente e da absorção de água, aspectos condizentes com a expectativa de resultado após queima.

Collatto *et al.* (2008) relata que a adição do resíduo orgânico provoca duas fases distintas durante a queima: a primeira é decorrente da fase líquida (fase vítrea), que faz com que resulte na diminuição do volume de poros provocando a retração da peça, e a segunda é decorrente da formação de uma fase volátil (liberação de gás) resultante da queima do material orgânico, que provoca o aparecimento de mais porosidade podendo causar expansão da peça. A teoria dos pesquisadores acima pode justificar o aumento da porosidade aparente e da absorção de água das massas cerâmicas aditivadas com lodo. Considerando que houve reduzida retração nos corpos cerâmicos aditivados com lodo, pode-se supor que os gases liberados durante a queima da matéria orgânica geraram poros internos, possivelmente, de pequenos tamanhos que pouco influenciaram na retração linear observada.

5.3. ENSAIO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS

A Figura 5.5 apresenta as curvas de resistência mecânica das formulações testadas, obtidas através de ensaio de flexão a quatro pontos, em função da temperatura de queima e dos teores de lodo de ETE adicionados à massa cerâmica.

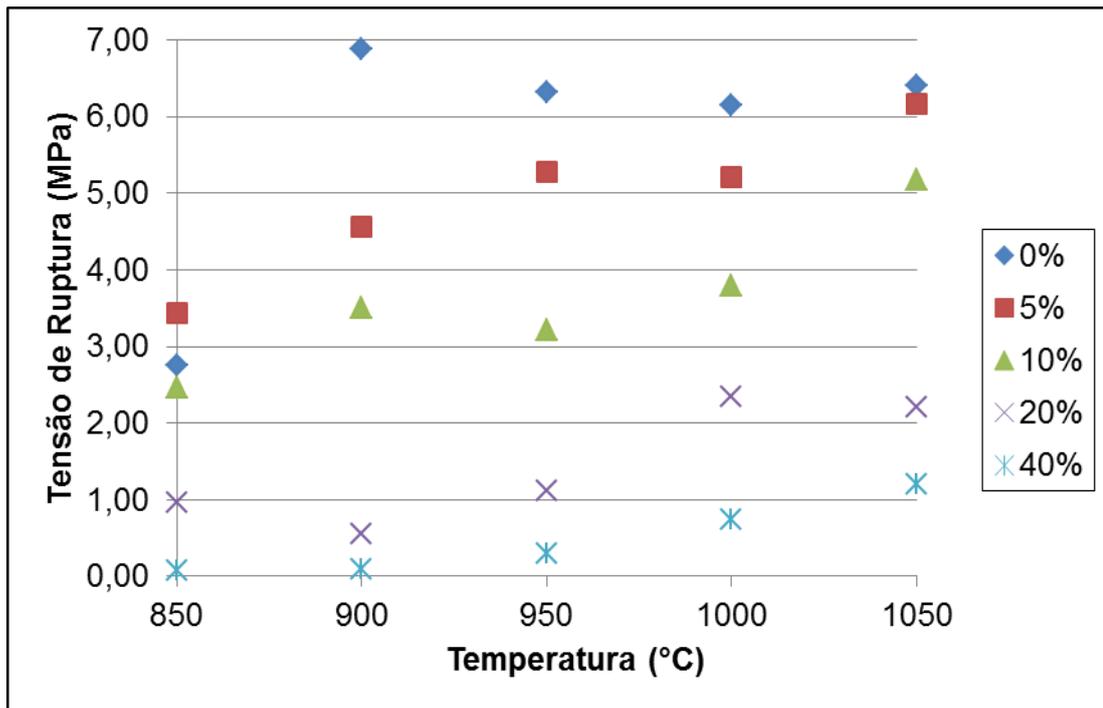


Figura 5.5: Resistência a flexão a quatro pontos dos corpos de prova de massa cerâmica pura e aditivada com lodo de ETE, em função da temperatura de queima e da quantidade de lodo adicionada.

Analisando-se comparativamente os resultados da Figura 4.9 observa-se que para as formulações com lodo de ETE a resistência a flexão a quatro pontos é menor que a da massa cerâmica pura, exceto para a formulação com 5% queimada a 850°C que apresentou um ganho de 25% de resistência. Este resultado já era esperado porque para as formulações com lodo a porosidade apresentou-se maior que a obtida na massa cerâmica pura e, como se sabe, a resistência mecânica de um corpo cerâmico depende do tamanho do maior defeito presente na microestrutura, neste caso sendo considerado os poros que devido a sua presença geram tensões que desencadeiam processos de ruptura.

Também, é possível observar que em todas as formulações com lodo ocorre aumento da resistência mecânica a medida que aumenta a temperatura de queima.

5.4. ANÁLISE AMBIENTAL

Como os resultados obtidos na análise química realizada nas matérias-primas não constam elementos cujos limites no extrato lixiviado estão listados na norma NBR 10004 (ABNT, 2004), optou-se pela realização, somente, do ensaio de solubilização. O referido ensaio foi feito somente nas formulações de massa que apresentaram o melhor comportamento mecânico, capazes de terem uma aplicação tecnológica.

As formulações ensaiadas foram a de massa cerâmica pura e de massas cerâmicas aditivadas com 5 e 10% de lodo ETE, todas queimadas a 900°C. Nesta etapa inseriu-se a massa cerâmica aditivada com 10% de lodo ETE porque esta apresentou baixa redução de resistência mecânica (10%) quando comparada a massa cerâmica pura, podendo, ser fonte de materiais cerâmicos de menor resistência mecânica tais como os tijolos maciços queimados.

Na análise de solubilização foram investigados elementos da massa cerâmica, tais como o alumínio, o ferro, o zinco o manganês e o cobre, que tem papel fundamental na fase de queima da mesma e nas características do produto final.

O alumínio é encontrado nas matérias-primas e durante o processo de queima pode sofrer transformações químicas, como por exemplo se juntar com a sílica das argilas e formar silicoaluminatos ou reagir com outros elementos, ainda sim é encontrado em concentrações menores que o limite permitido pela norma.

O ferro é o indicador da cor após a queima para os corpos cerâmicos que utilizam argila vermelha. Este elemento encontrado através do ensaio de solubilização indica uma tendência a cor final avermelhada das peças, resultado já esperado por ter concentrações altas nas matérias-primas utilizadas para sua produção.

Os outros metais encontrados na análise, zinco, manganês e cobre, estão em concentrações abaixo das iniciais nas matérias-primas. Essa assimilação pós queima pode ser ocasionada pela vitrificação que ocorre durante a sinterização por fase vítrea (ou líquida). A fase vítrea formada pode imobilizar esses elementos, não permitindo sua solubilização.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios de solubilização obtidos comparativamente aos valores limites da norma brasileira ABNT NBR 10004/2004.

Tabela 5.1: Ensaio de solubilização para as formulações de 0, 5 e 10% de lodo adicionados a uma temperatura de queima de 900°C.

Elemento	Unidade	Massa cerâmica	Massa cerâmica com 5% de lodo de ETE	Massa cerâmica com 10% de lodo de ETE	Limite Máximo ABNT NBR 10004/2004
Cobre	mg/L	<0,004	<0,004	<0,004	2,0
Zinco	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02	5,0
Ferro	mg/L	<0,04	<0,04	<0,04	0,3
Manganês	mg/L	<0,03	0,09	0,07	0,1
Alumínio	mg/L	0,1	<0,08	<0,08	0,2

Como pode-se ver na Tabela 5.1, para os elementos investigados, o extrato solubilizado das massas cerâmicas testadas não apresentou concentrações maiores que o permitido pela norma NBR 10006 (ABNT, 2004), sendo, por isto, possível classificar resíduos provenientes das massas cerâmicas testadas como Classe IIB - Inerte.

5.5. APLICAÇÃO TECNOLÓGICA

Para análise da aplicação tecnológica das massas cerâmicas com lodo de ETE na produção de materiais para a construção civil foram adotadas as normas ABNT NBR 15097-1:2011- Aparelhos Sanitários, ABNT NBR 15463:2007 - Placas

cerâmicas para revestimento, ABNT NBR 15270-1:2005 - Blocos cerâmicos de vedação, ABNT NBR 15270-2:2005 - Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e ABNT NBR 15310:2009 - Componentes cerâmicos – Telhas e seus critérios tecnológicos de absorção de água e resistência mecânica a flexão. A Tabela 5.2 apresenta os valores de cada critério em função da norma específica.

Tabela 5.2: Aplicação tecnológica para materiais cerâmicos conforme normas da ABNT.

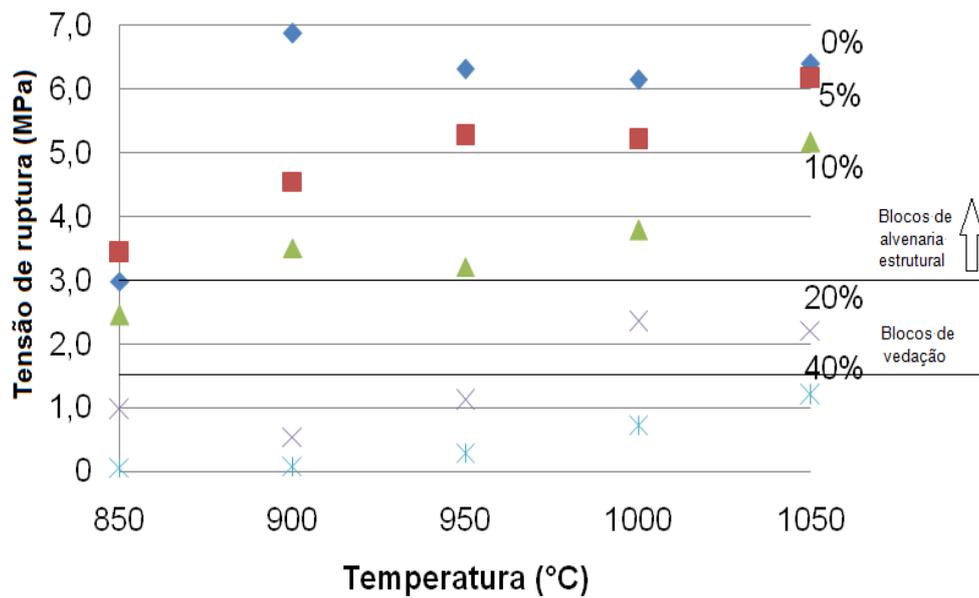
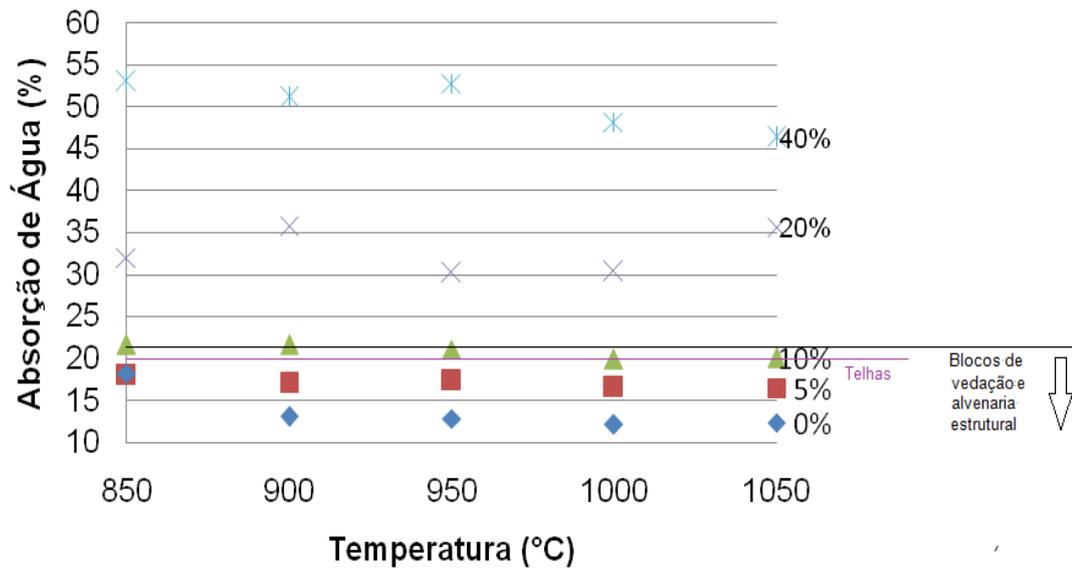
	ABNT NBR 15097- 1:2011 Aparelhos Sanitários	ABNT NBR 15463:2007 Placas cerâmicas para revestimento	ABNT NBR 15270- 1:2005 Blocos cerâmicos de vedação	ABNT NBR 15270- 2:2005 Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural	ABNT NBR 15310:2009 Componentes cerâmicos - Telhas
Absorção de água	≤0,75%	≤0,1%	8-22%	8-22%	≤20%
Resistência Mecânica	-	≥0,45MPa	Furos na horizontal ≥1,5MPa Furos na vertical ≥3,0MPa	≥3,0MPa	≥12,75MPa

Analisando-se os valores de absorção de água (Figura 5.4) e de resistência a flexão a quatro pontos (Figura 5.5) das massas cerâmicas testadas e os critérios tecnológicos da Tabela 5.2 observa-se que:

- i) Formulação sem adição de lodo da ETE: Para temperaturas a partir de 900°C pode ser utilizado como bloco cerâmico de vedação e alvenaria estrutural.

- ii) A formulação com adição de 5% de lodo: Pode ser utilizado para aplicação como bloco cerâmico de vedação e alvenaria estrutural para todas as temperaturas de queima.
- iii) A formulação com adição de 10% de lodo, para temperatura de queima de 850°C, pode ser utilizada somente para blocos cerâmicos de vedação e nas demais temperaturas para bloco cerâmico de vedação e alvenaria estrutural.
- iv) A formulação com adição de 20% de lodo não atingiu índices mínimos para absorção de água em todas as temperaturas, para todas as aplicações. Porém, para a resistência mecânica esta formulação atingiu para todas as temperaturas condições satisfatórias para a produção de placas cerâmicas de revestimento.
- v) A formulação com adição de 40% de lodo de ETE apenas foi satisfatório para placas cerâmicas de revestimento nas temperaturas de 1000°C e 1050°C para o requisito resistência mecânica e não atingiu índices mínimos para absorção de água em todas as temperaturas, para todas as aplicações.

A partir das observações feitas, fez-se os gráficos representativos da Figura 5.6, que sumarizam os resultados da estimativa de aplicação tecnológica das massas cerâmicas testadas, em função da absorção de água e da resistência mecânica.



Figuras 5.6 Estimativa de aplicação tecnológica das massas cerâmicas com lodo de ETE em função da absorção de água e da resistência a flexão a quatro pontos.

6. CONCLUSÕES

O trabalho realizado permite inferir as seguintes conclusões:

Quanto à obtenção de materiais cerâmicos com a incorporação de lodo de estação de tratamento de esgoto:

Os resultados obtidos possibilitam concluir que a inserção de lodo a massa cerâmica não alterou a cor característica dos produtos de cerâmica vermelha destinados à construção civil.

Considerando que busca-se a utilização do lodo de ETE na produção de produtos cerâmicos destinados a construção civil, cuja resistência mecânica é fator fundamental, em função dos resultados de resistência mecânica obtidos, pode-se intuir que o mais indicado é o uso do lodo de ETE na quantidade máxima de 10%. A presença de lodo possivelmente retardou o processo de sinterização, porém as peças apresentaram resultados satisfatórios com a adição de lodo, com algumas restrições para formulações de 20 e 40%.

Quanto às propriedades tecnológicas:

Os produtos obtidos apresentaram propriedades para aplicações tecnológicas, podendo ser utilizados para fabricação de bloco cerâmico de vedação, alvenaria estrutural.

Observadas algumas limitações, quanto às aplicações, os resultados foram favoráveis, sendo os que melhor representam essas condições, está o material com adição de 5% de lodo no qual podem ser utilizados como bloco cerâmico de vedação e alvenaria estrutural para todas as temperaturas de queima. Os resultados também mostraram-se satisfatórios nas formulações até 10% de lodo adicionado. Os resultados se aproximaram dos resultados obtidos com o material produzido somente com argila.

Como conseqüência, essa incorporação pode reduzir os custos do gerenciamento da ETE e de consumo de energia. Ganho econômico na reciclagem do resíduo e diminuição da extração de matérias-primas no meio ambiente.

Quanto à questão ambiental:

Para caracterização ambiental, por ensaio de solubilização para as formulações com até 10% de lodo adicionados a uma temperatura de 900°C, foi

demonstrado que o extrato solubilizado não impacta o meio ambiente, pois os elementos investigados são encontrados em concentração abaixo do limite para a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), anexo G.

Com este ensaio se pode concluir que a adição de lodo não interferiu nos elementos do produto final, podendo ser utilizado para confecção de materiais a temperatura de 900°C, bem abaixo da temperatura máxima investigada e ainda dar um destino final adequado para o lodo de ETE, sem interferência no meio ambiente.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, segue algumas sugestões:

- Analisar a incorporação do resíduo calcinado, em formulações já testadas neste trabalho;
- Avaliar a sinterização e conseqüentemente a estabilização do lodo de ETE em outras temperaturas de queima;
- Estudar a incorporação de mais de um resíduo, além do lodo de estação de tratamento de esgoto;
- Produzir em maior escala, produtos cerâmicos que obtiveram resultados satisfatórios neste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C – 133**: Test Method for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories. . United States of America, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C – 210**: Test Method for Reheat Change of Insulating Firebrick. United States of America, 1995.

ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484 p.

ARAUJO, P. R. L. de; ARAUJO, E. T. de; FARIAS FILHO, M. C.; MENDES, S. A. T. Mensuração dos resultados obtidos com ações de responsabilidade sócio-ambiental: Um novo componente na gestão de custos. In: Congresso Internacional de Administração, **Anais eletrônicos**, Ponta Grossa, PR, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. Disponível em <http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=50>, Acesso em: 06 de Julho de 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 10004**, Resíduos Sólidos – Classificação. Segunda edição, Rio de Janeiro, 2004. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 10005**, Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. Segunda edição, Rio de Janeiro, 2004. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 10006**, Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Segunda edição, Rio de Janeiro, 2004. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 15097-1**, Aparelhos Sanitários de Material Cerâmico – Requisitos e Métodos de Ensaio. Versão Substitutiva. Rio de Janeiro, 2011. 39p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 15463**, Placas Cerâmicas para Revestimento - Porcelanato. Norma em Revisão, Rio de Janeiro, 2007. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 15270-1**, Componentes Cerâmicos: Blocos Cerâmicos para alvenaria de Vedação – Terminologia e Requisitos. Primeira edição, Rio de Janeiro, 2005. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 15270-2**, Componentes Cerâmicos: Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural – Terminologia e Requisitos. Primeira edição, Rio de Janeiro, 2005. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 15310**, Componentes Cerâmicos – Telhas – Terminologia, Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2009. 47p.

BARCELLOS, I. O.; SOUZA, A. C. de; SELKE, A. E.; Incorporação de lodo industrial em compósitos de resina poliéster. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, nº 2, p. 155-159, 2009.

BARCELLOS, C.; GRACIE, R.; BARROS, H.; MAGALHÃES, M.; FEITOSA, P.; MATOS, V. Disseminação de informações sobre água, saúde e saneamento do Brasil: Aspectos institucionais e tecnológicos da construção do Atlas da água. RECIIS – **Revista Eletrônica de Com. Inf. Saúde**. Rio de Janeiro, vol. 6, n. 2, 2012.

BERSCH, R. A. **Avaliação da fluorescência em cerâmica vermelha com adição de lodo de fosfatização**. 2011. Dissertação de mestrado – Universidade do vale do Rio dos Sinos. PPGEC, São Leopoldo, RS.

BETTIOL, W.; CAMARGO, A. O. Lodo de esgoto: Impactos ambientais na agricultura. 1ª ed. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**. V1, 374p, 2006.

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 nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, 9 de janeiro. 1997.

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 União, 3 de agosto. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº. 430** de 13 de maio de 2011: dispõe sobre as condições e

padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, 16 de maio. 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência dos materiais** – Uma introdução. John Wiley & Sons. Editora – LTC. 7ª Edição. 2009.

COLLATTO, D.; BERGMANN, C. P.; RAMIRES, M. V. V. Influência da Granulometria do Resíduo de Celulose nas Propriedades do Material Cerâmico. **Estudos Tecnológicos**, vol. 4, nº1: 01-11, 2008.

CONSEMA. Conselho Estadual do Meio Ambiente, **Resolução nº 128**, 24 de novembro de 2006. Dispõe sobre a Fixação de Padrões de Emissões de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Rio Grande do Sul. Diário Oficial da União, 25 de novembro. 2006.

COSTA, D. da. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. 2006. 194f. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

COSTA, M. C. R.; DAMILIANO, C. R.; VASCONCELLOS, A.; COSTA, R.C. Diagnóstico ambiental da área industrial contaminada por metais pesados. **Revista de biociências**. Vol.14, n.1, p. 51-61, 2008.

COSTA, A. P. J. da; SILVA, A. L.; MARTINS, R. dos S. Um estudo sobre estações de tratamento de efluentes industriais e sanitários da empresa Dori Alimentos LTDA. REGRAD – **Revista de graduação UNIVEM**, Marília-SP, v. 1, ano 2, p. 6-22, 2009.

FADANELLI, L. E. A.; WIECHETECK, G. K. Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 2, nº 2, 2010.

FERNADES, F.; LOPES, D. D.; ANDREOLI, C. V.; SILVA, S. M. C. P. da. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. **Lodo de esgoto: Tratamento e Disposição Final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, Companhia de Saneamento do Paraná. Cap. 7. p. 299-317, 2001.

FERREIRA, L. C. **Potencial da Utilização de Resíduos Industriais na Formulação de Massa de Cerâmica Vermelha Para a Fabricação de Blocos de Vedação.** 2012. Dissertação de Mestrado - UFPR, Curitiba.

GEYER, A. L. B. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto.** 2001. 216f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre.

GONÇALVES, D. **Caracterização Mineralógica por Difração de Raios X e o Método de Rietveld da Fração Argila de um Latossolo Vermelho Distrófico em Três Manejos Diferentes.** 2008. 176f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.

GOUVEIA F. P.; SPOSTO R. M. Incorporação de Chamote em Massa Cerâmica para a Produção de Blocos. Um Estudo das Propriedades Físico-Mecânicas. **Cerâmica 55**, 415-419, 2009.

IBGE. Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1998&id_pagina=1> Acesso em: 20 de Agosto de 2012.

IBGE, Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/pdfs/introducao.pdf> Acesso em: 20 de agosto de 2012.

JIN, B.; WILEN, B.; LANT, P. A comprehensive Insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge. **Chem. Eng. J.**, v. 95, p. 221-234, 2003.

JÚNIOR, J. C. C. S. **Avaliação da Potencialidade de Argilas de Queima Clara como Matérias-Primas para o Desenvolvimento de Novos Produtos Cerâmicos.** 2008. Dissertação de Mestrado - UFRN, Natal, RN.

JUNIOR, A. M. O.; NASCIMENTO, A. G. de J.; SILVA, T. C. S.; ANDRADE, S. F.; SANTOS, E. J.; MARQUES, J. J. Uso de reator air-lift em bateçada para tratamento de efluentes de uma indústria de beneficiamento de coco. **Exacta**, Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil. vol. 9, n. 2, p. 251-259, 2011.

KAZMIERCZAK, C. C. Produtos de Cerâmica Vermelha. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, vol. 1, p. 563-585, 2007.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de Resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **RAMA**, vol. 1, nº 3, 2008.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica 54**, p. 411-417, 2008.

MARCO, R. M. F. de. **Diagnóstico da geração e disposição dos resíduos sólidos urbanos nos municípios da 7ª região administrativa do estado de São Paulo**. 2009. 201f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Bauru.

MEDRI, W.; MEDRI, V. Otimização de sistemas de lagoas de estabilização para tratamento de dejetos suínos. **Ciências Exatas e Tecnológicas - SEMINA**, v. 25, n. 2, p. 203-212, 2004.

MENEZES, M. de P. **Gerenciamento do resíduo sólido de estação de tratamento de água e estudo de disposição no meio ambiente**. CEFET/Goiás, 2006.

MONDARDO, D.; BELLON, P. P.; SANTOS, L. B.; MEINERZ, C. C.; HAOUI, A. F. Proposta de recuperação ambiental na área urbana da microbacia do Rio Ouro Monte. 2º International Workshop: **Advances Cleaner Production**, São Paulo, 2009.

MORAIS, D. S. G. de. **Análise das propriedades termofísicas, mecânicas e geométricas de telhas cerâmicas queimadas em forno caieira e forno abóbada**. 2011. 58f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia.-PPGEM. Natal, RN.

MORETTO, L.; SILVA, A. S. da; PINHEIRO, D. K. Administração pública municipal de resíduos sólidos em Santa Maria – RS: Uma reflexão ambiental. **Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental REGET-CT/UFSM**. Vol. 1, p. 99-114, 2010.

NÓBREGA, K. C.; WANDERLEY, A. S. D.; LEITE, A. M. D.; ARAUJO, E. M.; MELO, T. J. A. de. Obtenção e caracterização de argilas organofílicas visando à aplicação em nanocompósitos poliméricos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, p 84-90, 2011.

NUNES A., ALBUQUERQUE B., SILVA L., ARAUJO A. **Remoção de matéria orgânica e coliformes termotolerantes de uma estação de tratamento de efluentes industriais de Natal-RN**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2010.

NUVOLARI, Ariovaldo et al (coord.). **Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola**. São Paulo: Blücher, 2003.

OLIVEIRA, M.F., PILZ E.B., BELLINCANTA G.S., LIMBERGER N., MACEDO N. T., CORÇÃO G., GERMANI J. C. E VAN DER SANT S. T. Avaliação da eficácia do tratamento de esgotos de um sistema de lagoa de estabilização através da identificação de população bacteriana. **Acta Scientiae Veterinariae**. Porto Alegre, RS. 34(1): 31-37, 2006.

PECORA, V. **Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de caso**. 2006. 153f. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

PEREIRA, R. da S. Identificação e caracterização das fontes de poluição em sistemas hídricos. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 1, n.1, p. 20-36, 2004.

PINHEIRO, R. M.; VIEIRA, C. M. F.; RODRIGUEZ, R. S.; MONTEIRO, S. N. Reciclagem de Resíduo Proveniente da Produção de Papel em Cerâmica Vermelha. **Revista Matéria**, v. 13, n. 1, p. 220-227, 2008.

PUREZA, J. C. C. **Utilização de Resíduos Industriais de Baixa Granulometria em Massas Cerâmicas de Argila Vermelha: Aspectos Tecnológicos e Ambientais**. 2004. 132p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEM, Porto Alegre.

ROSA, R. P. DA. **Consumo Energético para Produção de Blocos de Concreto: Estudo Comparativo com Blocos Cerâmicos Através da Avaliação do Ciclo de Vida**. 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SALVADOR, R. M. **Detecção e quantificação de Enterovirus em lodo de esgotos com potencial uso na agricultura do estado de São Paulo**. 2011. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública. São Paulo.

SANTOS, I. M. G.; SILVA, J. M.; TRINDADE, M. F. S.; SOLEDADE, L. E. B.; SOUZA, A. G.; PASKOCIMAS, C.A.; LONGO, E. **Cerâmica** 51. 144, 2005.

SANTOS, L. M. dos; LEITE, W. C.; LUZ, F. de M. M.; SAAB, S. da C. Determinação do potencial agrícola do lodo de esgoto por meio de análises físico-químicas e microbiológicas. **Synergismus Scyentifica**, UFTPR. Pato Branco, 06 (1), 2011.

SILVA, P. L. B. da. **Obtenção e Caracterização de Cerâmica Vermelha Utilizando na Matéria-Prima Resíduo Argiloso do Rerrefino de Óleos Minerais**. 2010. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre.

SINDICATO DE OLARIA E DE CERÂMICA PARA CONSTRUÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL - SINDICER. Diagnóstico da Indústria da Cerâmica Vermelha no Estado do Rio Grande do Sul. **Relatório de pesquisa**. Porto Alegre, RS, 2008, 60p.

SPERLING, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3ª ed. Belo Horizonte. **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental**; Universidade Federal de Minas Gerais; v.1, 452 p, 2005.

SPERLING, Marcos Von. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. [Belo Horizonte]: **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG**. v. 1, 3.ed. 2005.

TELOEKEN, A. C.; VILLANOVA, D. L.; BASEGIO, T. M.; BERGMANN, C.P. Utilização de lodo galvânico como matéria-prima em cerâmica vermelha e caracterização dos corpos cerâmicos obtidos quanto a propriedades tecnológicas e a imobilização de metais. **Revista Cerâmica Industrial**. São Paulo. Vol. 16(2), p. 14-19, 2011.

TONETTI, A. L.; CERQUEIRA, R. S.; FILHO, B. C.; SPERLING, M. V.; FIGUEIREDO, R. F. de. Tratamento de esgotos de pequenas comunidades pelo método do escoamento superficial no solo. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 13, p. 69-79, 2009.

TORRES P.; FERNANDES H. R.; AGATHOPOULOS S.; TULYAGANOV D. U.; FERREIRA J. M. F.; EUR J. **Ceram. Soc.** **24**. 3177, 2004.

TUCCI, C. M. Inundações urbanas. Porto Alegre: **ABRH/RHAMA**. 393 p, 2007.

VICENZI, J.; BERNARDES, A. M.; BERGMANN, C. P. Evaluation of alum sludge as raw material for ceramic products. **Industrial Ceramics**. Vol. 25, n1, p. 171-180, 2005.

9. ANEXOS

ANEXO I

Resultados individuais dos corpos de prova para o ensaio de retração linear para as formulações nas temperaturas de queima:

	850°C	900°C	950°C	1000°C	1050°C
	Média/Desvio Padrão (%)				
0%	0,08/0,09	0,13/0,08	0,36/0,31	0,54/0,23	0,94/0,33
5%	0,11/0,05	0,13/0,12	0,51/0,42	0,80/0,11	1,07/0,31
10%	0,11/0,05	0,18/ 0,08	0,37/0,20	0,84/0,19	1,50/0,26
20%	0,23/0,11	0,24/0,11	0,28/0,10	1,57/0,43	2,15/0,49
40%	0,62/0,15	0,99/0,07	1,54/0,47	3,00/0,26	3,86/0,85

ANEXO II

Resultados individuais dos corpos-de-prova para o ensaio de Porosidade Aparente para as formulações nas temperaturas de queima:

	850°C	900°C	950°C	1000°C	1050°C
	Média/Desvio Padrão (%)				
0%	32,81/1,92	23,20/1,47	25,06/0,87	23,97/1,26	23,94/1,22
5%	31,35/0,70	28,96/8,99	30,82/0,81	29,54/1,00	29,28/0,67
10%	35,40/0,92	35,24/0,57	34,98/0,76	32,89/1,40	32,51/2,87
20%	44,13/0,60	44,62/2,39	42,54/6,04	42,88/3,67	46,98/0,57
40%	55,18/1,50	52,20/3,92	56,60/0,87	54,37/1,05	51,81/2,75

ANEXO III

Resultados individuais dos corpos-de-prova para o ensaio de Absorção de Água para as formulações nas temperaturas de queima:

	850°C	900°C	950°C	1000°C	1050°C
	Média/Desvio Padrão (%)				
0%	18,26/1,58	13,11/0,59	12,87/0,55	12,19/0,47	12,36/0,78
5%	18,00/0,61	17,10/5,44	17,38/0,65	16,59/0,75	16,52/0,56
10%	21,69/0,76	21,64/0,55	21,08/0,63	19,91/1,36	20,09/1,32
20%	32,03/1,19	35,86/3,11	30,19/5,11	30,34/4,79	35,65/0,84
40%	53,06/2,22	51,16/5,37	52,83/1,64	48,23/1,98	46,40/2,88

ANEXO IV

Resultados individuais dos corpos-de-prova para o ensaio mecânico nas formulações para as temperaturas de queima:

	850°C	900°C	950°C	1000°C	1050°C
	Média/Desvio Padrão (N/mm ²)				
0%	2,75/0,85	6,88/0,57	6,31/0,39	6,15/0,25	6,39/1,09
5%	3,44/0,58	4,55/0,78	5,28/1,15	5,20/0,48	6,16/0,70
10%	2,45/0,38	3,51/0,56	3,22/0,82	3,79/0,59	5,17/1,01
20%	0,97/0,16	0,55/0,22	1,12/0,11	2,35/1,08	2,22/0,30
40%	0,03/0,03	0,09/0,03	0,30/0,06	0,73/0,13	1,20/0,31