UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESTUDO DE REAPROVEITAMENTO NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALUNO: BARTHOLOMEU SIQUEIRA JÚNIOR
ORIENTADOR: PROF. Dr. YOGENDRA P. YADAVA

Recife, fevereiro de 2011

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S618c Siqueira Júnior, Bartholomeu.
Caracterização de resíduos de estação de tratamento de água e estudo de reaproveitamento na indústria de cerâmica vermelha / Bartholomeu Siqueira Júnior. - Recife: O Autor, 2011.
xi, 73 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Yogendra P. Yadava.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011.
Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica. 2. Lodo de ETA. 3. Resíduo de ETA. 4. Caracterização. 5. Reaproveitamento. I. Yadava, Yogendra P. II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.) BCTG/2011-120

"CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESTUDO DE REAPROVEITAMENTO NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA ".

BARTHOLOMEU SIQUEIRA JÚNIOR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (UFPE)

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

Prof. Dr. ARNALDO MANOEL PEREIRA CARNEIRO (UFPE)

DEDICATÓRIA

A minha mãe, ao meu pai, às minhas irmãs e amigos pela paciência e incentivo na realização deste objetivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por todas às bençãos que recebi em toda minha vida.

A minha mãe, Maria de Fátima Silva Siqueira, pelo amor, carinho e incentivo aos estudos.

Ao meu pai Bartholomeu Siqueira, pelo ensinamentos de respeito e honestidade e as minhas irmãs Regina Cely Silva Siqueira e Renata Sueli Silva Siqueira pelo amor, paciência e compreensão nestes anos de estudos.

Ao meu orientador Yogendra Prasad Yadava, pelos ensinamentos, pela imensa paciência e apoio ao longo deste trabalho.

À minha grande amiga Nancy Lins pelo apoio e pela amizade.

Aos grandes amigos Charles Marques e Boaz Filho pela amizade e pelo incentivo para continuar em frente.

Ao Engenheiro Pedro Amílton por disponibilizar os resíduos da ETA Botafogo.

A todos os professores e funcionários do DEMEC/UFPE pela participação em minha formação profissional e pessoal.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Cerâmicas Especiais Luciana, Felipe, Lenita, Ricardo e Timóteo, que tanto me ajudaram neste trabalho.

A equipe de Laboratório de Microscopia do DEMEC/UFPE pelo auxílio na utilização do microscópio.

Enfim agradeço a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Vários fatores contribuem para a qualidade de vida e saúde da população. Um dos mais importantes é a qualidade da água que utilizamos nas diversas atividades diárias: consumo para eliminar a sede, higiene diária, lavagem dos alimentos, etc. Para que a água atenda aos padrões de potabilidade exigidos pelas legislações específicas ela passa por vários processos de tratamento em unidades denominadas Estações de Tratamento de Água (ETA) e neste tratamento são gerados resíduos denominados lodo de ETA. Este lodo é constituído de todos os resíduos orgânicos e inorgânicos presentes nas águas brutas dos rios e mananciais, tais como: areias, argilas, silte, bactérias, vírus, protozoários, ferro, manganês, cálcio, etc.

Desde o começo da utilização de ETAs no tratamento de água até o presente momento, o destino desses resíduos são os corpos d'água, sem a realização de nenhum tipo de processamento dos lodos, porém, devido à crescente deterioração dos rios e o interesse da sociedade com o meio ambiente, os órgãos ambientais e o próprio poder público estão exigindo alternativas para esta situação.

O tratamento dos lodos das ETAs e sua possível utilização em outros processos produtivos industriais podem ser soluções viáveis a questão, beneficiando a natureza com a redução do impacto ambiental e impedindo que novas matérias-primas sejam retiradas da natureza, além de otimizar os investimentos e minimizar os custos das indústrias.

Este trabalho tem como objetivo caracterizar o Lodo da Estação de Tratamento de Água Botafogo, pertencente à Companhia Pernambucana de Saneamento, situada na Cidade de Igarassu-Pernambuco, e analisar sua viabilidade como matéria-prima na indústria de tijolos vermelhos. O lodo é gerado em algumas etapas do processo de tratamento da água bruta e foi tratado na Unidade Piloto de Tratamento de Resíduos de ETA situada dentro desta estação.

O resíduo foi submetido aos seguintes ensaios: análise química, através dos resultados da fluorescência de raios - X e difração de raios X(DRX). Para realização destes experimentos foram confeccionados corpos de prova sinterizados em várias temperaturas, que foram caracterizados através dos ensaios cerâmicos de retração linear de queima, absorção de água, perda ao fogo, microscopia ótica, microdureza vickers e resistência à compressão. Os resultados obtidos pelas análises e ensaios indicam o grande potencial para reaproveitamento na indústria de tijolos cerâmicos, pois os corpos de prova apresentaram propriedades compatíveis, inclusive com valores de resistência à compressão superiores aos de blocos cerâmicos. Os melhores resultados foram obtidos nas sinterizações a 1.000ºC, com tratamento térmico anterior, em que se eliminou o material orgânico contido no lodo, demonstrando a necessidade de utilizar processos que retirem este constituinte do resíduo para otimizar suas propriedades.

Palavras – chave: lodo de ETA**,** resíduo de ETA, caracterização, reaproveitamento.

ABSTRACT

Several factores contribute to quality of life and health. One of the most important the quality of water that use in various daily activities: consumption to remove the seat daily hygiene, washing food, etc. therefore to the water meets drinking standards required by specific laws it passes through various treatment processes in units called stations, water treatment plant (WTP) and waste generated in this treatment are called WTS. The sludge is composed of all organic and inorganic residues present in raw water form rivers and spring, such as sand, clay, silt, bacteria, viruses, protozoa, iron, manganese, calcium, etc.

Since de begin use of WTP for water treatment at the moment, the fate of these wastes are water bodies without performing any processing of the sludge, due to the increasing deterioration of the rivers and the interest of society with the environment, the agencies and the public administration are demanding alternatives to this situation.

The treatment of sludge from water treatment plants and their possible use in other industrial processes maybe viable solutions to question the nature benefiting from the reduced environmental impact and preventing new raw, materials are taken from nature, and optimize investment and minimize the costs of industries.

The research aims to characterize the sludge from the Water Treatment Plant Botafogo, belonging to the Pernambuco's Sanitary Company, located in the in the city of Igarassu, Pernambuco, and evaluate his suitability as a feedstock in the manufacture of the red bricks. The sludge is generated in some stages of treatment of raw water and was treated at the Pilot Waste Treatment ETA located within this station. The residue was subjected to the following tests: chemical analysis, through the results of ray fluorescence-X and X-ray diffraction (DRX). In this perform, these experiment were prepared speciments sintered at various temperatures, which were characterized by tests of linear shrinkage of ceramic firing, water absorption, ignition loss, optical microscopy, Vickers hardness and compressive strength. The result obtained by analysis and tests indicate a great potential for reuse in the industry of ceramic bricks, because the specimens were compatible properties, including compressive strength values higher than brick. The best results were obtained in the sintering at 1,000 , with the heat treatment made before, which eliminated the organic material contained in the sludge, demonstrating the need of processes that remove this constituent of the waste to optimize their properties.

Key words: sludge WTP, waste WTP, characterization, retriveral.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA 6

2.1 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DAS ÁGUAS 6

2.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA 8

2.2.1 Tecnologia de Ciclo Completo 9

2.3 GERAÇÃO DE LODO NA ETA BOTAFOGO 13

2.3.1 Etapas do Tratamento de Água Bruta 14

2.3.1.1 Captação de Água Bruta 14

2.3.1.2 Calha Parshall 15

2.3.1.3 Floculadores 15

2.3.1.4 Decantadores 15

2.3.1.5 Filtros de Areia 16

2.3.1.6 Desinfecção 17

2.3.1.7 Reservatório 17

2.3.2 Etapas do Tratamento do Efluente da ETA 18

2.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS LODOS DE ETAs 19

2.5 ARGILAS COMO MATÉRIAS-PRIMAS DE INDÚSTRIAS QUÍMICAS 22

2.6 PROCESSAMENTO DE CERÂMICAS VERMELHAS 23

2.6.1 Classificação das Cerâmicas 23

2.6.2 Considerações sobre Indústria de Cerâmicas vermelhas 24

3. MATERIAIS E METODOLODOGIA 27

3.1 MATERIAIS 27

3.2 METODOLOGIA 27

3.2.1 Preparação das Amostras dos resíduos 29

3.2.2 Análises Químicas dos resíduos 31

3.2.2.1 Fluorescência de Raios X 31

3.2.2.2 Difração de Raios X 32

3.2.2.3Análise Termogravimétrica (TGA) 33

3.2.2.4 Microscopia Óptica 34

3.2.3 Confecção dos Corpos de Prova 35

3.2.4 Ensaios Cerâmicos 36

3.2.4.1 Retração Linear (RL) 36
3.2.4.2 Perda ao Fogo (PF) 37
3.2.4.3 Absorção de Água (AA) 37
3.2.4.4 Microdureza Vickers 38
3.2.4.5 Resistência à Compressão 39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 40
4.1 ANÁLISES QUÍMICAS 40
4.1.1 Fluorescência de Raios X 40
4.1.2 Difração de Raios X 41
4.2 Microscopia Óptica 45
4.3 Análise Termogravimétrica (TGA) 49
4.4 ENSAIOS CERÂMICOS 50
4.4.1 Retração Linear de Queima a 800°C, 900ºC e 1000ºC 50
4.4.2 Perda ao Fogo (PF) 57
4.4.3 Absorção de Água 60
4.4.4 Microdureza Vickers 62
4.4.5 Resistência à Compressão 64
5. CONCLUSÕES 66
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 67
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS 68

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Esquema típico de um sistema de abastecimento 1
1.2 Principais Tecnologias de tratamento de água para consumo humano 2
2.1 Disponibilidade Hídrica no Brasil 6
2.2 Mapa parcial do Estado de Pernambuco 13
2.3 Fotografia da ETA Botafogo 13
2.4 Fluxograma de processo da ETA com Tratamento dos Efluentes gerados 14
2.5 Tubulação Adutora de água bruta da ETA Botafogo 15
2.6 Calha Parshall da ETA Botafogo 15
2.7 Floculadores da ETA Botafogo 16
2.8 Decantadores da ETA Botafogo 16
2.9 Filtros da ETA Botafogo 17
2.10 Equipamento medidor de vazão de Cloro 17
2.11Caixa D'água elevada 18
2.12 Geotubo da ETA Botafogo 19
2.13 Fluxograma de fabricação de Cerâmica Vermelha 26
3.1 Resíduo da ETA retirado do gel têxtil 27
3.2 Fluxograma da Metodologia do Processamento e Caracterização dos Resíduos da ETA 28
3.3 Estufa de Secagem 29
3.4 Moinho de bolas do Laboratório de Cerâmicas 30
3.5 Amostra de Resíduo após Secagem, Moagem e Peneiramento 30
3.6 Espectrômetro de Fluorescência de Raios 31
3.7 Difratômetro de Raios X 32
3.8 Microbalança de ATG 33
3.9 Microscópio Óptico 34
3.10 Prensa Hidráulica de 15 Toneladas MARCON 35
3. 11 Corpo de Prova de Retração Linear 37
3.12 Durômetro do Laboratório de Cerâmica Especial 39
3.13 Prensa Hidráulica 39
4.1 Difratograma para a amostra 1 a 800° 41
4.2 Difratograma para a amostra 2 a 900° 42
4.3 Difratograma para a amostra 3 a 1000° 42

4.4 Difratograma de Raio X do Al_2O_3 43
4.5 Difratograma de Raios X de SiO_2 43
4.6 Difratogramas de Raios X do Fe_2O_3 44
4.7 Fotografias com Aumento de 50x e 100x a 800°C 45
4.8 Fotografias com Aumento de 200x e 500x a 800°C 46
4.9 Fotografias com Aumento de 50x e 100x a 900°C 46
4.10 Fotografias com Aumento de 200x e 500x a 900°C 47
4.11 Fotografias com Aumento de 50x e 100x a 1000°C 47
4.12 Fotografias com Aumento de 200x e 500x a 1000°C 48
4.13 Fotografias com Aumento de 50x e 100x a 1000°C 48
4.14 Fotografias com Aumento de 200x e 500x a 1000°C 49
4.15 Análise Termogravimétrica 49
4.16 Corpos de prova antes de Sintetização a 800°C 51
4.17 Corpos de prova depois de Sintetização a 800°C 51
4.18 Corpos de Corpos de prova antes de Sintetização a 900° C 52
4.19 Corpos de Corpos de prova depois de Sintetização a 900°C 52
4.20 Corpos de Corpos de prova antes da 1ª Sintetização a 1000°C 52
4.21 Corpos de Corpos de prova depois da 1ª Sintetização a 1000°C 53
4.22 Corpos de Corpos de prova antes da 2ª Sintetização a 1000°C 53
4.23 Corpos de Corpos de prova depois da 2ª Sintetização a 1000°C 54
4.24 Médias dos Valores de Retração 56
4.25 Médias dos Valores de Perda ao Fogo dos Corpos de Prova 60
4.26 Médias dos Valores de Absorção de Água dos Corpos de Prova 61
4.27 Médias dos Valores de Microdureza Vickers dos Corpos de Prova 64
4.28 Valores de Resistências à compressão dos Corpos 65

ÍNDICE DE TABELAS

1.1 Características Típicas de Lodos de Sulfato de Alumínio 3
2.1 Dados de lodos de decantadores de algumas ETAs da RMSP 20
2.2 Dados de descargas de decantadores de algumas ETAs de SP 20
2.3 Composição Química do Resíduo seco em estufa da ETA Goytacazes. 21
2.4 Dados da Indústria de Cerâmica Vermelha 24
2.5 Números do Setor – Cerâmica vermelha 25
3.1. Parâmetros avaliados nos ensaios cerâmicos com os corpos de prova 36
4.1 Análise Química do Resíduo da Estação de Tratamento de Água de Botafogo 40
4.2: Resultados das medições nos diâmetros nas pastilhas sinterizadas à 800ºC 54
4.3 Resultados das medições nos diâmetros nas pastilhas sinterizadas à 900ºC 55
4.4 Resultados das medições nos diâmetros nas pastilhas sinterizadas à 1.000ºC (1º sinterização). 55
4.5 Resultados das medições nos diâmetros nas pastilhas sinterizadas à 1.000ºC (2º sinterização) 56
4.6 Resultados das pesagens nos corpos de prova sinterizados à 800ºC 58
4.7 Resultados das pesagens nos corpos de prova sinterizados à 900ºC 58
4.8 Resultados das pesagens nos corpos de prova sinterizados à 1.000ºC 59
4.9 Resultados das pesagens nos corpos de prova sinterizados à 1.000ºC (2º sinterização) 59
4.10 Resultados das pesagens no ensaio de Absorção de Água. 61
4.11 Resultados da análise de microdureza nas amostras a 900ºC. 62
4.12 Resultados das análises de microdureza nas amostras a 1.000ºC (1ª sinterização) 63
4.13 Resultados das análises de microdureza nas amostras a 1.000ºC (2ª sinterização). 63

LISTA DE SIGLAS

ABC Associação Brasileira de Cerâmica

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA Agência Nacional de Águas

ASCE American Society of Civil Engineers

ATG Análise Termogravimétrica

AWWA American Water Work Association

CONAMA Conselho Nacional de Meio Ambiente

DBO Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO Demanda Química de Oxigênio

ETA Estação de Tratamento de Água

FDA Filtração Direta Ascendente

FDD Filtração Direta Descendente

G/L Gramas por Litro

ITEP Instituto Tecnológico de Pernambuco

MG/L Miligramas por Litro

MMA Ministério do Meio Ambiente

pH Potencial Hidrogeniônico

RMR Região Metropolitana de Recife

RMSP Região Metropolitana de São Paulo

SST Sólidos Suspensos Totais

SSV Sólidos Suspensos Voláteis

UFPE Universidade Federal de Pernambuco

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem de primeira importância para a vida. Os organismos dos animais necessitam de água para realizar todas as reações metabólicas e também de muitos elementos que estão dissolvidos nas águas.

No entanto as águas naturais podem conter organismos, substâncias, compostos e elementos prejudiciais à saúde, devendo ter seu número ou concentração reduzidos para fim de abastecimento público (DI BERNARDI, 2008).

Os sistemas de abastecimento público fornecem aos consumidores água dentro de padrões estabelecidos pela Portaria Nº518 do Ministério da Saúde e são normalmente constituídos das seguintes etapas: captação de água bruta (in natura), adução, tratamento, reservação e distribuição. A figura 1.1 mostra um esquema típico geral de abastecimento de água, que é utilizado pelas empresas de saneamento no Brasil.

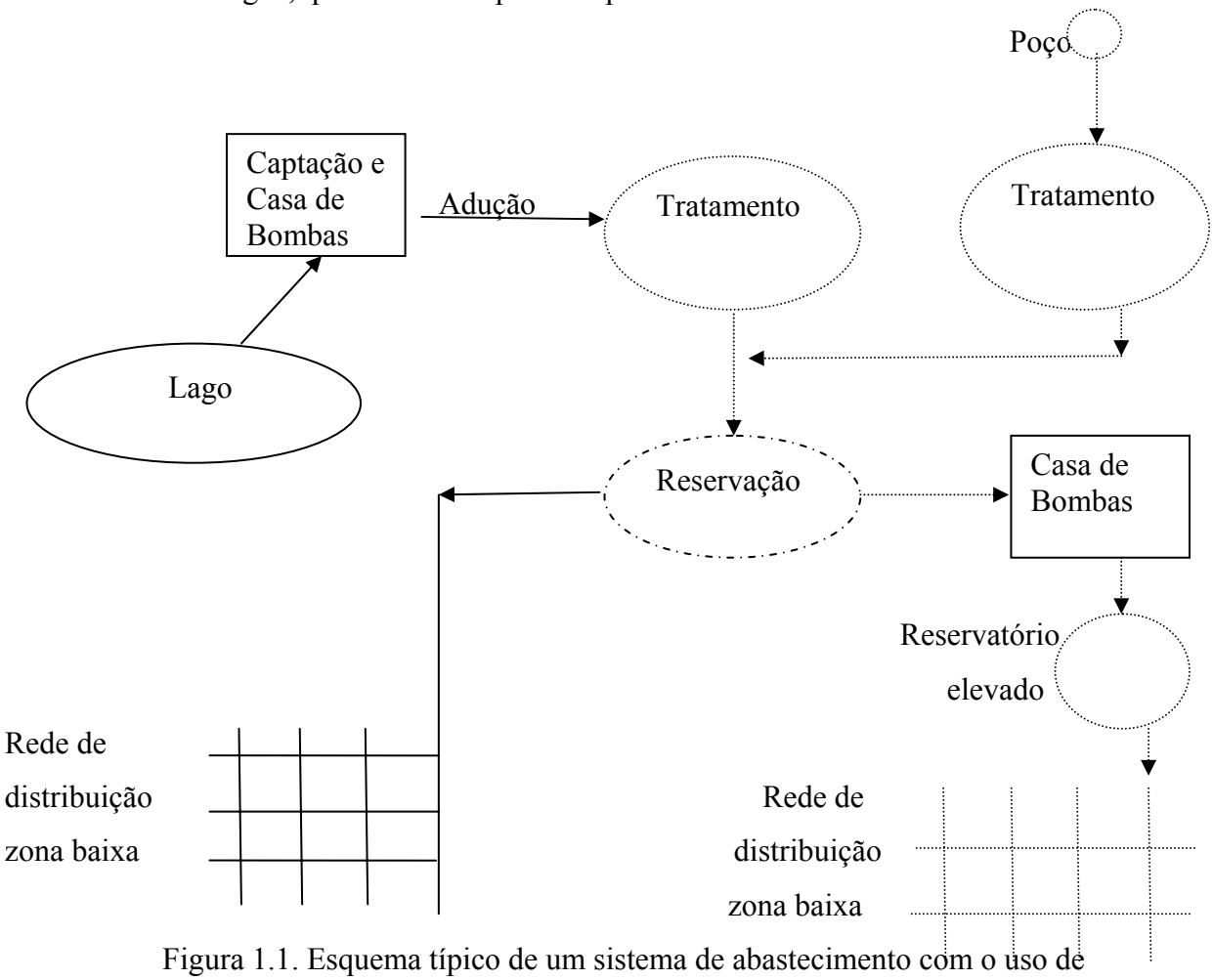

Figura 1.1. Esquema típico de um sistema de abastecimento com o uso de água superficial e subterrânea.

Fonte: DI BERNARDO (2008)

O tratamento de água constitui um dos principais etapas do processo de abastecimento público, pois ocorrem os processos que garantem a qualidade da água para o consumo humano. Para realizar esta transformação da água bruta em água potável a ETA utiliza os processos de coagulação, floculação, decantação e filtração, adicionados de diversos componentes formando resíduos que serão removidos por sedimentação e filtração, principalmente nos decantadores, sendo estes resíduos chamados de lodo de ETA (TSUTIYA *et al*, 2001). São utilizados também os processos de desinfecção, tais como; uso de Cloro, hipoclorito, ozônio, lâmpada ultravioleta, etc, para garantir a qualidade microbiológica da água. A figura 1.2 apresenta os principais tipos de processos utilizados nos tratamento de águas para abastecimento humano.

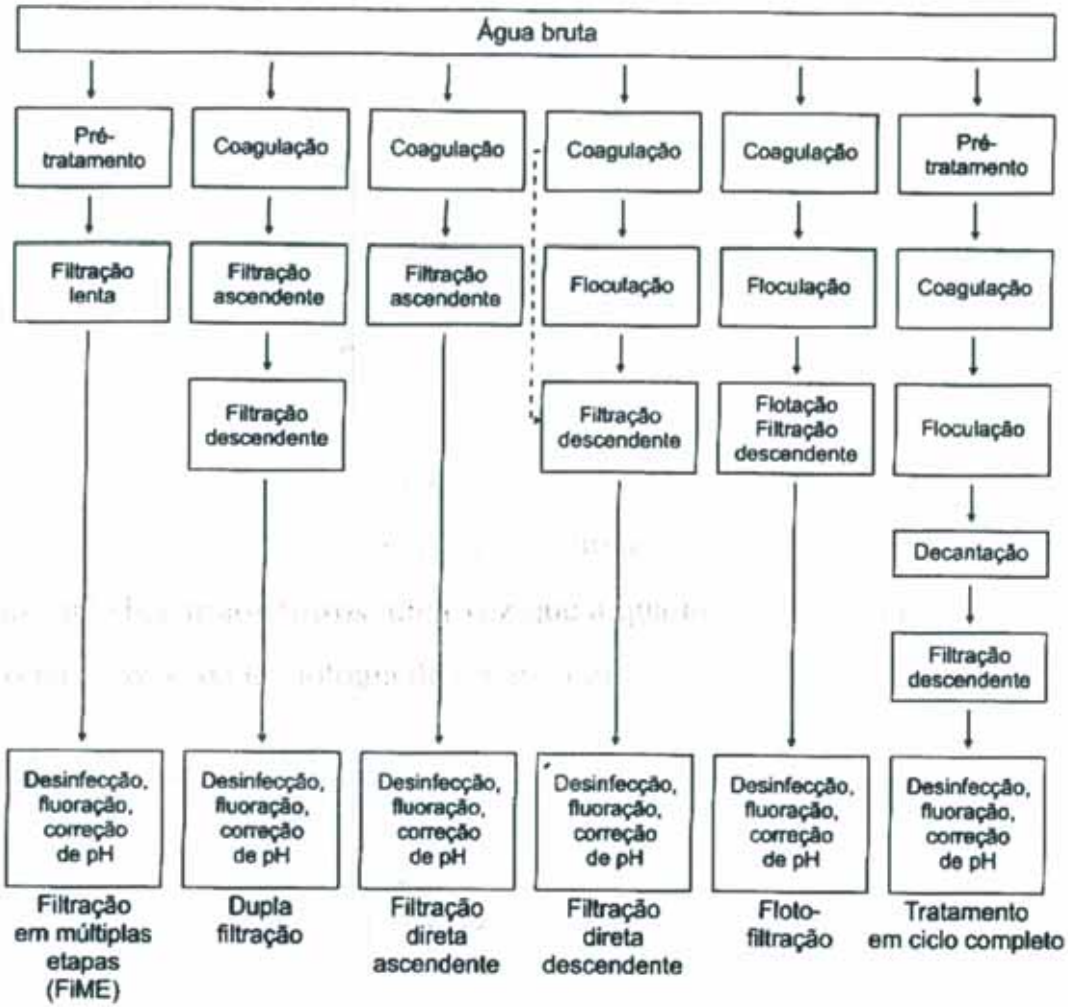

Figura 1.2. Principais Tecnologias de tratamento de água para consumo humano

Fonte: DI BERNARDO (2008)

Os tratamentos de água geram resíduos, pois todos os contaminantes que poderiam ocasionar problemas de saúde foram retirados e incorporados à massa líquida chamada lodo. Este lodo é caracterizado como um fluido não newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se em estado gel em repouso e relativamente líquido quando agitado (PORTELLA et al,2003).

O lodo da ETA é constituído de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes das águas brutas, tais como: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areias, argilas, silte, cálcio, magnésio, ferro, manganês, etc (Gradin et al, 1993). Pela norma NBR10004 este lodo é caracterizado como resíduo sólido, e deve ser tratado e disposto conforme exigência dos órgãos reguladores (PORTELLA et al,2003).

O teor de sólidos totais no lodo varia entre 1.000 e 40.000mg/L (0,1 a 4%) sendo deste, de 75 a 90% sólidos suspensos e 20 a 35% compostos voláteis, apresentando , portanto, uma pequena porção biodegradável, mas o qual pode ser prontamente oxidável. A massa específica do lodo da ETA varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes neste, ela pode variar de 1,002kg/m^3 para lodos com teor de sólidos de 1% , até 1,5kg/m3 após processo de desidratação (RICHTER,2001).

Durante o processo de tratamento de água são utilizados coagulantes que desestabilizam as partículas coloidais, formando flocos com tamanho suficiente para remoção. Geralmente estes coagulantes são sais de ferro e alumínio, que devido as suas cargas desestabilizam as partículas (PORTELLA et al,2003). A ETA Botafogo utiliza como coagulante o Sulfato de Alumínio, produto mais barato entre os coagulantes do mercado. A Tabela 1 apresentará algumas características típicas de lodos provenientes de ETAS que utilizam o sulfato de Alumínio.

Tabela 1.1:Características Típicas de Lodos de Sulfato de Alumínio.

Sólidos Totais(%)	**$Al_2O_3.5H_2O$ (%)**	**Inorgânicos (%)**	**Matéria Orgânica(%)**	**pH**	**DBO (mg/L)**	**DQO (mg/L)**
0,1- 4	15- 40	35-70	15-25	6-8	30-300	30-5000

Fonte: RICHTER(2001)

Quando o lodo é retirado das unidades operacionais da ETE (filtro ou decantador) apresentasse em estado líquido e ocupa grande volume devido á grande quantidade de

água presente. Para que seja transportado é necessário retirar a maior parte da água constituinte do lodo, desta forma aumentando a concentração de sólidos no resíduo, caso contrário o custo de transporte deste material tornar-se-ia excessivo. Existem vários processos para realizar o desaguamento, e a desidratação do lodo produzido na ETA, os principais modelos são (DI BERNARDO,2008):

-Lagoas de secagem;

-Centrífugas;

-Leitos de secagem;

-Filtros-prensa (de esteira, placas ou parafuso);

-Peneiras rotativas;

-Filtração em Geotextil .

Cada técnica de desaguamento possui suas peculiaridades, vantagens e desvantagens e, por isso, devem ser avaliadas conforme seu desempenho e seus gastos com investimento e funcionamento para selecionar a melhor alternativa. Em qualquer caso, no desaguamento, recomenda-se que a torta gerada tenha uma concentração de Sólidos Suspensos Totais superior a 200g/L (ou teor de SST maior que 20% em massa/massa) (DI BERNARDO,2008).

Após a retirada de grande parte da água contida no lodo, este pode ser transportado para outro local onde possa ocorrer o aproveitamento em outro processo produtivo economicamente e ecologicamente viável ou ser enviado para um destino final que não ofereça riscos ao meio ambiente e à sociedade.

Os métodos de disposição final utilizados são (DI BERNARDO,2008):

-Aterros;

-Estações de tratamento de esgotos;

-Disposição em corpos d'água.

As alternativas técnicas viáveis para aproveitamento do lodo de ETA são os seguintes (DI BERNARDO,2008).:

-Fabricação de blocos cerâmicos e tijolos;

-Fabricação de cimento e incorporação de lodo em matriz de concreto;

-Recuperação de solos agrícolas;

-Recuperação de coagulantes;

-Auxiliar na decantação de água com baixa turbidez;

-Recirculação de águas na ETA

Diante de todas estas alternativas para destino final do lodo é preciso analisar criteriosamente cada solução e para isto é necessário conhecer as características físico-químicas e reológicas do resíduo da ETA.

O presente trabalho tem como objetivo conhecer as características do Lodo da Estação de Tratamento de água de Botafogo, sendo este resíduo passou por processo de desaguamento em uma Estação Piloto de Tratamento de Efluentes de ETA, que utilizou o processo de Filtração em membrana geotextil (bags). Como objetivo secundário realizaremos a comparação de algumas destas características com as características de tijolos utilizados em alvenaria, de modo a estimar sua viabilidade técnica neste processo industrial.

Na realização e consolidação dos resultados obtidos neste trabalho foram utilizadas técnicas de Análise Química através dos resultados da Fluorescência de Raios- X e da Difração de Raios-X, e Ensaios Cerâmicos (Retração Linear de Queima, Absorção de Água, Perda ao Fogo, Microdureza Vickers e Resistência à Compressão) nos corpos de prova cerâmicos sinterizados das 2 amostras do resíduo seco extraído dos bags, sem a utilização de aditivos químicos na confecção dos corpos de prova.

A dissertação está composta por sete capítulos. No capítulo 1 o assunto é introduzido de maneira reduzida. O capítulo 2 é destinado à revisão bibliográfica, tratando da importância do estudo da água, processos de tratamento de água, geração de formação do resíduo da ETA Botafogo, características químicas de lodo de ETAs e processamento de cerâmicas vermelhas. No capítulo 3 encontram-se os materiais e métodos utilizados na pesquisa, o capítulo 4 contém os resultados e discussão, o capítulo 5 as conclusões finais, o capítulo 6 sugestões para trabalhos futuros e o capítulo 7 as referências bibliográficas.

Os experimentos foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco e no ITEP- Instituto Tecnológico de Pernambuco e o resíduo foi cedido pela Companhia Pernambucana de Saneamento. Esta parceria é uma tentativa válida de lidar com o problema do destino final destes resíduos, que é um grande desafio para todas as empresas de saneamento e uma grande questão para a sociedade, incluindo órgãos ambientais e fiscalizadores do meio ambiente.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2. 1 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA ÁGUA

A água é um recurso imprescindível para manutenção da vida, e para as inúmeras atividades humanas (agricultura, indústria, navegação, etc). Por este motivo a humanidade sempre buscou fixar-se em locais onde houvesse disponibilidade de recursos hídricos para que pudesse gerar os insumos necessários à sobrevivência.

O consumo médio de água no planeta é extremamente variável, entre $40m^3$/hab.ano (Etiópia) e $2000m^3$/hab.ano (EUA). Esse consumo no Brasil é da ordem de $350m^3$/hab.ano. Do consumo anual de água do planeta, aproximadamente 69% destinam-se ao setor agrícola, 29% ao industrial e apenas 10% ao doméstico (DI BERNARDO,2008).O Brasil possui grande quantidade de água em seu território, com 12% da água doce disponível no mundo e 28% do total presente no Continente Americano. Segundo o Ministério do Meio Ambiente /Agência Nacional de Águas (MMA/ANA,2007), o país é considerado rico em termos de vazão média por habitante com, aproximadamente, $33x10^3m^3$/hab.ano, mas apresenta uma grande variação espacial e temporal das vazões. A região hidrográfica amazônica, por exemplo, detém 74% dos recursos hídricos superficiais e é habitada por menos de 5% da população brasileira; o restante do país com 95% da população, dispõe de somente 26% da água doce, segundo Di Bernardi,2008.

A figura 2.1 apresenta a disponibilidade hídrica do país, verificando a existência de algumas regiões pobres de água (<$2500m^3$/hab.ano) e outras em situação crítica (<$1500m^3$/hab.ano) conforme verificado por Borguetti *et al*. 2004 (Apud DI BERNARDO ,2008).

Figura 2.1. Disponibilidade Hídrica no Brasil

Fonte : DI BERNARDO ,2008

Segundo a MMA/ANA (2007), a menor vazão média é observada na região hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, com média inferior a 1200m^3/ano. Destacam-se na condição de pouca disponibilidade, algumas bacias do Atlântico Leste, Parnaíba e São Francisco. Estas regiões compreendem uma parte do Nordeste do Brasil, região de clima predominantemente seco e com regimes de chuvas intermitentes.

Entre os estados do Nordeste o estado da Bahia, graças ao Rio São Francisco e suas áreas sedimentares esparsas, chega a dispor de mais água do que o estado de São Paulo; porém, que precisa cuidar de vastas regiões semi-áridas. Nos demais estados nordestinos (Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe) a situação é preocupante, pois os volumes oferecidos são inferiores a 2.500m^3/hab.ano. Paraíba e Pernambuco se destacam, o primeiro com disponibilidade de cerca de 1.437m^3/hab.ano; o segundo, dispondo de apenas 1.320m^3/hab.ano é o campeão em baixa oferta de água para os seus habitantes (LORETZ, 2008).

Diante da reduzida quantidade disponível de água doce é cada vez necessário utilizar racionalmente e com o mínimo desperdício possível dos recursos hídricos disponíveis. Existe um fator muito importante que afeta diretamente o uso das águas: o impacto da poluição gerada por todas as atividades humanas. Todos os processos industriais utilizados para gerar os recursos utilizados na sociedade (água potável, alimentos, vestiário, habitação, veículos, etc) produzem resíduos com potencial para danificar o meio ambiente, mesmo local de onde foram retiradas as matérias-primas originais usadas nos processos produtivos. Este ciclo das cadeias produtivas pode ser exemplificado no Abastecimento de água potável das cidades: a água bruta é captada nos mananciais para ser tratada nas Estações de Tratamento de água e ser distribuída para a população. Durante o processo de tratamento são gerados resíduos que se não forem tratados e dispostos em locais adequados voltam a poluir os rios, lagos e outros corpos d'água.

A maioria dos resíduos das ETA provêm dos filtros e decantadores. Os floculadores e tanques de preparo de produtos químicos produzem quantidades insignificantes de resíduos em lavagens periódicas (GRADIN et al, 1993).

No Brasil uma grande parcela do resíduo produzido nas estações de tratamento são destinados aos rios sem nenhum tipo de tratamento ou alternativa de disposição, contribuindo para deteriorar a qualidade das águas, assorear as margens dos rios, contribuir para o desequilíbrio nas espécies nativas. Além destas conseqüências, o destino inadequado do lodo piora a característica do manancial, de modo que se alguma

estação de tratamento, localizada à jusante, utilizar este corpo d'água para captação, terá que usar mais recursos para realizar ao tratamento, incluindo mais produtos químicos nos processos que ocorrem na ETA.

Diante da escassez dos recursos hídricos e da crescente deterioração do meio ambiente é necessário buscar e implantar alternativas de processamento e destino dos resíduos de Estações de Tratamento de águas de todo o país e também criar uma cultura de responsabilidade social e preservação do meio ambiente, tanto dos cidadãos quanto das empresas privadas e públicas do nosso país.

2.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

O controle da poluição das águas é de grande importância para todos os países, principalmente os desenvolvidos, pois a introdução de substâncias químicas nos corpos de água, oriundas de fontes antrópicas, é uma ameaça a seus usos preponderantes e ao funcionamento dos ecossistemas. A necessidade de medidas para impedir e controlar a liberação dessas substâncias nos ambientes aquáticos conduz ao desenvolvimento de políticas e estratégias para o gerenciamento baseada em critérios para a qualidade das águas (HELMER e HESPANHOL, 1997).

Considerando que é muito mais eficaz concentrar os recursos disponíveis para ações que visem encontrar e minimizar a fonte de contaminação a instalar estações de tratamento caras e complexas para a remoção das substâncias poluentes à obtenção de água potável, muitos países esforçam-se para assegurar que a qualidade da água bruta requeira o uso de processos próximos aos naturais, tais como: filtração e desinfecção (HELMER e HESPANHOL, loc. cit).

Assim, as operações e processos utilizados no tratamento de água para abastecimento público visam torná-la adequada ao consumo humano, obedecendo aos critérios de qualidade definidos pelos padrões de potabilidade de forma a atender as condições de higiene, ser agradável aos sentidos, estar isenta de concentração de microorganismos e substâncias orgânicas e inorgânicas não prejudiciais a saúde. No Brasil, a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde define os padrões de potabilidade de água para abastecimento público (RIBEIRO, 2007)

A escolha da tecnologia de tratamento adequada a ser utilizada irá depender das características, físicas, químicas e biológicas de cada água, podendo exigir tratamento

simplificado, convencional e outros mais específicos, sempre visando atender os padrões de potabilidade exigido pela Legislação.

Segundo Di Bernardo et al (2008), a seleção da tecnologia deve satisfazer três conceitos fundamentais: múltiplas barreiras, tratamento integrado e tratamento por objetivos.

O conceito de múltiplas barreiras, no sistema de abastecimento de água, está relacionado à necessidade de mais de uma etapa de tratamento, de maneira, a alcançar condições de baixo risco. As etapas existentes devem juntas remover progressivamente os contaminantes produzindo água de qualidade satisfatória promovendo proteção máxima contra os agentes de veiculação hídrica (SOLANO,2000).

Por sua vez, o tratamento integrado, sugere que as combinações de barreiras devam ser de tais formas realizadas que produzam o efeito esperado. A estratégia de tratamento por objetivos considera que cada fase de tratamento possui uma meta específica de remoção relacionada a algum tipo de risco (GALVIS et al,1998).

As tecnologias de tratamento podem ser resumidas em dois grupos com coagulação química e sem coagulação. Temos assim, os seguintes tipos de tratamento: ciclo completo, flotofiltração, filtração direta descendente, dupla filtração, filtração direta ascendente e filtração em múltiplas etapas (DI BERNARDO,2008).

2.2.1 Tecnologia do ciclo completo

Esta tecnologia é comumente denominada de tratamento convencional e consiste na coagulação da água bruta, geralmente com um sal de alumínio ou ferro no mecanismo da varredura. Nesse mecanismo há o predomínio da formação de precipitado do metal do coagulante, nos quais são aprisionadas as impurezas (AZEVEDO NETO E RICHER,2001).

A coagulação é um processo que consiste na desestabilização das partículas coloidais ou neutralização das moléculas de substâncias húmicas, através de dois fenômenos; o primeiro, químico, em que ocorrem as reações do coagulante com a água e a formação de espécies hidrolisadas com cargas positiva ou os precipitados do metal do coagulante usado; o segundo, físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas ou dos precipitados para promoção do contato com as impurezas presentes na água, de maneira que formem aglomerados maiores, os quais podem ser removidos nas unidades seguintes (LEMES,1979).

A coagulação ocorre na unidade de mistura rápida, a qual pode ser hidráulica, mecânica ou especial, dependendo da vazão a ser tratada, da variação da qualidade da água bruta e das condições disponíveis para operação e manutenção. É na unidade de mistura rápida que ocorre a dispersão rápida e uniforme do coagulante utilizado (CHEREMISINOFF, 1995).

Em seguida, a água coagulada é submetida à agitação lenta (floculação) durante um tempo necessário para que os flocos alcancem o tamanho e a massa específica suficientes para serem removidos por sedimentação (nos decantadores) ou por flotação (nos flotadores).

A floculação é a operação que sucede à mistura rápida e consiste no agrupamento das partículas desestabilizadas, de modo, que formem aglomerados maiores denominados flocos, susceptíveis de remoção nas unidades seguintes. Este processo pode ser realizado em unidades mecanizadas ou hidráulicas. A necessidade da variação da intensidade de agitação (função das características da água bruta e da variação de vazão em relação ao projeto) indica a escolha de unidades mecanizadas. Caso contrário, deve-se utilizar a floculação hidráulica (DI BERNARDO e DANTAS,2005).

Por outro lado, a sedimentação que ocorre nos decantadores, é um fenômeno físico em que, devido à ação da gravidade, as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica indo depositar-se no fundo da unidade formando o lodo. Ao se depositarem nos decantadores, os flocos formam uma camada de lodo no fundo destas unidades, esta camada é removida periodicamente. A ocorrência da sedimentação das partículas suspensas propicia clarificação do meio líquido, ou seja, separação das fases líquida e sólida (AWWA,1999). No Brasil, a maioria das Estações de Tratamento de Água utiliza o processo de sedimentação para clarificação de suas águas.

Os decantadores podem ser convencionais ou de altas taxas; os primeiros são grandes tanques, de escoamento horizontal ou vertical,enquanto os últimos são unidades menores que em pregam módulos de plásticos ou placas planas paralelas ou lonas de plástico. A remoção de lodo pode ser realizada de forma contínua, semi-contínua ou periódica. O uso de dispositivos extratores de lodo e da execução de descargas diárias tem sido preferido nas ETAs pois facilitam o tratamento dos resíduos.

A NBR 12216(1992) recomenda, entre outros, na remoção do lodo, que:

- o decantador com remoção manual de lodo deve ser provido de descarga(s) de fundo para que o esvaziamento ocorra no tempo menor que 6h, as descarga(s) deve(m) ser localizada(s), preferivelmente, na zona de maior acumulação de lodo, e o fundo deve ter declividade mínima de 5% no sentido da(s) descarga(s);

- a descarga deve possibilitar que o lodo seja observado;

- devem ser obedecidas, quando for usado qualquer tipo ,de raspador mecânico, as seguintes condições, ter poço de descarga com fundo inclinado com ângulo superior a 50º com o plano horizontal, em forma de tronco de pirâmide ou de cone invertido, devendo a descarga ser localizada na sua extremidade inferior, velocidade máxima do raspador de 0,3m/min, a descarga do poço sempre automática e sincronizada com o movimento do raspador.

No caso da flotação, o método por ar dissolvido é comumente empregado no sistema, sendo as micro-bolhas produzidas pela redução de pressão da água saturada com ar. Assim, a flotação clarifica a água pela ascensão das partículas suspensas aderidas às micro-bolhas de ar. Os métodos de produção de micro-bolhas utilizados são: flotação eletrostática (produção de micro-bolhas de hidrogênio e oxigênio em uma solução aquosa diluída devido à passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos), flotação por ar disperso (utiliza produtos químicos para geração e sustentação das micro-bolhas) e flotação por ar dissolvido (AWWA, 2002; REALI et al, 2003).

Normalmente o material flotado, obtido no processo de coagulação, apresenta-se com consistência, reduzindo a possibilidade de desagregação durante a remoção. A velocidade de deslocamento do equipamento de remoção de lodo é, geralmente, inferior a 1m/min e a sua rotação menor que 1rpm/min (DI BERNARDO,2008).

A água clarificada, produzida nos decantadores ou flotadores, é finalmente filtrada em unidades com escoamento descendente, contendo materiais granulares com granulometria apropriada (areia ou antracito e areia). Assim, a filtração consiste na remoção de partículas (suspensas e coloidais, além de microrganismo) d'água que escoa através de um meio poroso. Em geral, a filtração é o processo final de remoção de impurezas realizado em uma ETA e, portanto, principal responsável pela produção de água qualidade que atendam o padrão de potabilidade. Após um determinado tempo de funcionamento, há necessidade da lavagem do filtro (meio filtrante), geralmente, pela introdução de água no sentido ascensional com velocidade relativamente alta para promover a fluidificação parcial do meio granular com liberação das impurezas (ARBOLEDA,2000).

Filtração direta descendente

A filtração direta descendente (FDD) é uma tecnologia adotada para águas com turbidez e cor verdadeira relativamente baixas em ETAs do tipo completo. A água bruta é coagulada no mecanismo de adsorção/neutralização de carga e às vezes floculada, passando em seguida, aos decantadores antes de ser submetida à filtração.

Filtração direta ascendente

A filtração direta ascendente (FDA) vem sendo utilizada com sucesso no tratamento de água para consumo humano em diversos países, inclusive no Brasil. No país estimava-se mais de 350 estações de filtração direta ascendente em funcionamento, com vazões de 5 a 2000L/s, em diversos Estados (PROSAB,2003).

Segundo HAMANN et al *(*1968), ao descrever a operação desse tipo de filtro, citou que o coagulante deveria ser adicionado à bruta imediatamente antes do filtro, com a finalidade de forma micro-agregados, assim, a coagulação no interior do meio filtrante era mais rápida e completa em contacto com a superfície dos grãos de areia, comparada à coagulação obtida em unidades hidráulicas ou mecânicas.

A vazão para lavagem de filtro ascendente é determinada a partir da fixação da velocidade ascensional que causa a expansão adequada do meio filtrante; enquanto, a vazão para aplicação na interface pode ser fixada entre 600 e 1000m^3/m^2.d (DI BERNARDO,2008).

Dupla filtração

A dupla filtração surgiu dos estudos realizados visando reduzir as limitações das tecnologias FDA e FDD no tratamento de água com contaminação relativamente elevada. A instalação de dupla filtração pode funcionar com taxa constante ou declinante, tantos nos filtros ascendentes quantos nos descendentes. Os filtros podem está conjugados, os dois ocupando a mesma unidade, ou fisicamente separados (SABOGAL PAZ, 2007).

Desta maneira, as características e quantidades dos resíduos gerados irão depender da escolha do tipo de tratamento de água adotado, da qualidade da água bruta, dos produtos e dosagens utilizadas, das reações químicas ocorrida no processo, da forma de remoção e do tempo de retenção destes resíduos nas unidades de tratamento.

2.3 GERAÇÃO DE LODO NA ETA BOTAFOGO

A ETA Botafogo, situada na cidade Igarassu-Pernambuco, trata, atualmente, uma vazão de 1.800 L/s de água bruta de vários mananciais: Rio Catucá (Barragem Botafogo), Rio Cumbe, Rio Pilão, Rio Tabatinga, entre outros e produz aproximadamente 17% da água distribuída na RMR (Região Metropolitana de Recife), atendendo as cidades de Igarassu, Cruz e Rebouças, Abreu e Lima, Paulista e Olinda (COMPESA, 2010). A Figura 2.2 apresenta a localização da cidade de Igarassu no estado de Pernambuco.

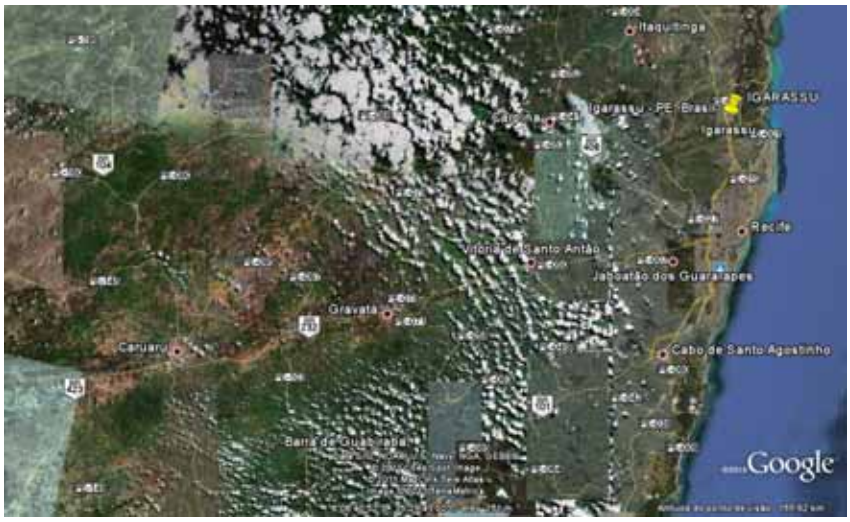

Figura 2.2 Mapa parcial do Estado de Pernambuco Fonte: www.google.com.earth

Na figura 2.3 são apresentadas as instalações da ETA Botafogo.

Figura 2.3 Fotografia da ETA Botafogo Fonte: www.google.com.earth

2.3.1 Etapas do Tratamento de Água Bruta na ETA Botafogo

O processo de Tratamento utilizado nas ETA Botafogo é um tratamento de ciclo completo, que utiliza os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

Na figura 2.2 é exposto um fluxograma do tratamento da água realizado na ETA citada, incluindo os principais resíduos gerados em cada etapa.

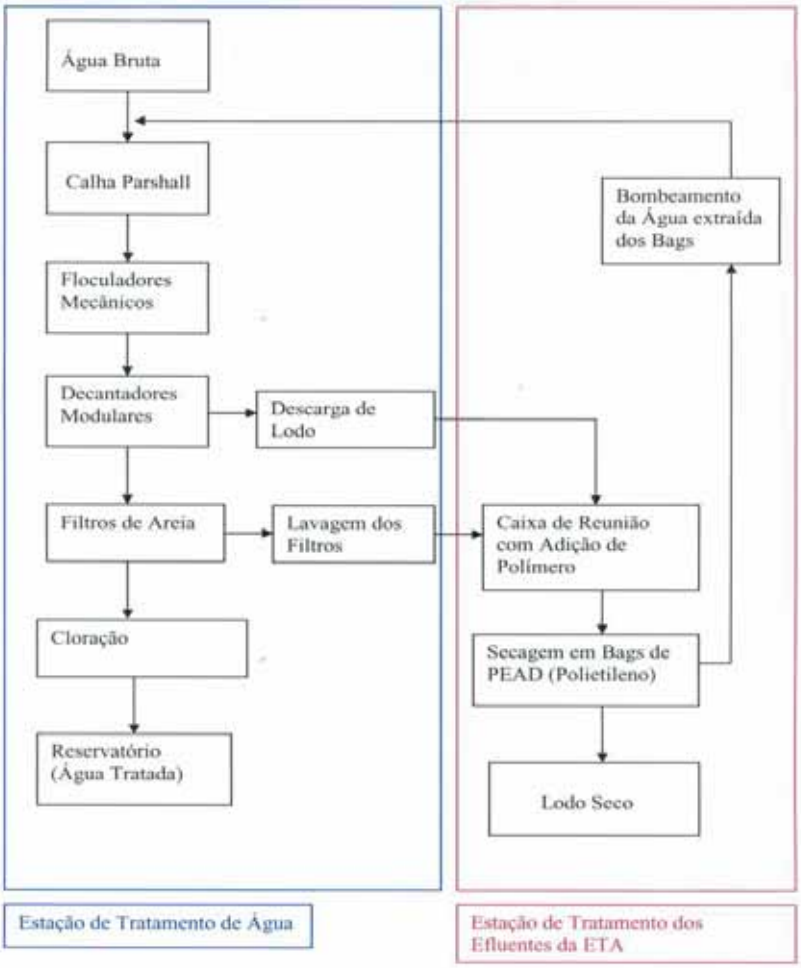

Figura 2.4 Fluxograma de processo da ETA com Tratamento dos Efluentes gerados

Fonte: COMPESA (2010)

Cada etapa do processo será descrita ao longo deste capítulo:

2.3.1.1 Captação de Água Bruta

A água bruta (aquela que não recebeu nenhum tratamento) é retirada do corpo hídrico (barragem, rio, represa, etc) através de tubulação fixas (tubos) ou móveis (mangotes flexíveis) conectados às bombas que succionam a água e a impulsionam diretamente para o local do tratamento (ETA) ou para outra estação(s) elevatória(s) através de tubulações , para posteriormente ser enviada ao tratamento.

Figura 2.5 Tubulação Adutora de água bruta da ETA Botafogo

Fonte: COMPESA (2010)

2.3.1.2 Calha Parshall

A Calha Parshall é constituída por um estreitamento no canal aberto que recebe a água bruta. Neste local a água recebe os produtos químicos necessários para iniciar o tratamento: normalmente um composto coagulante e, se necessário, um produto químico para ajuste de pH.

Figura 2.6 Calha Parshall da ETA Botafogo

Fonte: COMPESA (2010)

2.3.1.3 Floculadores

Nesta etapa as câmaras do floculadores, que são tanques abertos de concreto, fornecem as condições de agitação necessárias para que ocorram reações entre o produto coagulante e as impurezas presentes na água, formando flocos que se reúnem, aumentando gradativamente seus tamanhos.

Figura 2.7 Floculadores mecânicos da ETA Botafogo

Fonte: COMPESA (2010)

2.3.1.4 Decantadores

O decantador é uma grande câmara aberta sem agitação, onde os flocos formandos nos floculadores decantam sob ação da gravidade, e vão para o fundo do decantador. A água sem os flocos escoa por tubulações localizadas no final da câmara, na altura da linha d'água e segue para os filtros. O lodo depositado no fundo do decantador (aproximadamente 540 m^3) é retirado periodicamente por escoamento hidráulico (1 vez ao dia), através de tubulações ou abertura de comportas de fundo e escoa para uma caixa de concreto e depois para a unidade de tratamento dos resíduos.

Figura 2.8 Decantadores da ETA Botafogo

Fonte: COMPESA (2010)

2.3.1.5 Filtros de Areia

Os filtros são constituídos por câmaras abertas preenchidas com areia de várias granulometrias e antracito (carvão mineral pulverizado), e têm a função de reter todos os sólidos presentes na água (flocos, microrganismos, etc) oriundos do decantador. Periodicamente são realizadas lavagens em contracorrente com água tratada para retirar

os sólidos adsorvidos pela areia. Este resíduo das lavagens (aproximadamente 1.000m^3 por dia) é transportado para a unidade de tratamento de resíduos. No caso da ETE Botafogo, a unidade de tratamento de resíduos é uma unidade piloto que ainda não recebia o resíduo da lavagem dos filtros.

Figura 2.9 Filtros de Areia da ETA Botafogo

Fonte: COMPESA (2010)

2.3.1.6 Desinfecção

Para que ocorra desinfecção da água, e conseqüente morte dos microrganismos (bactérias, vírus, etc), a água que sai dos filtros recebe Cloro gasoso, sendo o gás injetado diretamente na tubulação que transporta a água para o Tanque de armazenamento de água clorada.

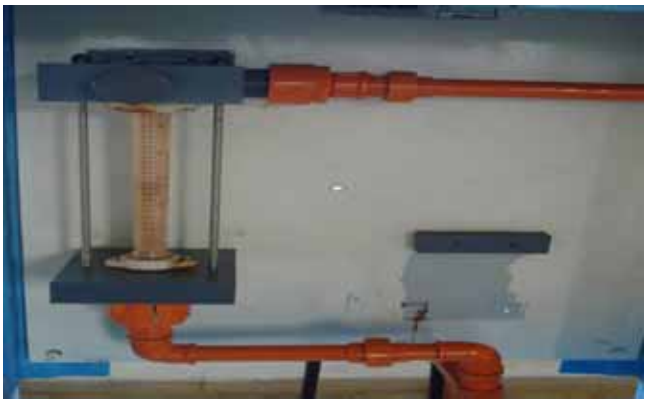

Figura 2.10 Equipamento medidor de vazão de Cloro.

Fonte: COMPESA (2010)

2.3.1.7 Reservatório

No tanque de armazenamento a água tratada é armazenada para ser distribuída, de acordo com a demanda, para as cidades, através de uma rede de distribuição (tubulações, unidades de armazenamento, reservatórios, bombas, etc) e também para ser utilizada, quando necessário, nas lavagens dos filtros de areia e decantadores.

Figura 2.11 Reservatório elevado.
Fonte: COMPESA (2010)

2.3.2 Etapas do Tratamento dos Efluentes da ETA

O processo de Tratamento dos Efluentes das ETAS (Estações de Tratamento de Água) consiste em retirar do lodo (efluente líquido da ETA) a maior parcela possível de líquido, de modo a reaproveitar esta água e enviá-la de volta ao tratamento, e armazenar o resíduo seco formado de forma compacta, de modo ocupar o mínimo espaço possível. Posteriormente o resíduo deverá ser transportado para o seu destino final, que poderá ser um aterro controlado, reciclagem em algum tipo de processo industrial que possa utilizá-lo como matéria-prima, ou, alguma alternativa economicamente e ecologicamente viável.

Na ETA Botafogo o efluente gerado pela descarga dos decantadores escoa, por gravidade, até uma caixa de concreto, que serve apenas como caixa de passagem, e depois para o tubo confeccionado com membrana geotêxtil de Polietileno (Bags). A tubulação que transporta o lodo para o Bag recebe a adição de solução de polímero com a função de auxiliar a separação sólido/líquido no lodo, de forma que a água escoe com facilidade para fora do bag. Esta água é recolhida em um poço e bombeada de volta para o tratamento e parte sólida do lodo fica armazenada no bag.

Figura 2.12 Geotubo da ETA Botafogo.
Fonte: COMPESA (2010)

2.4 CARACTERISTICAS QUÍMICAS DOS LODOS DE ETAS

O tratamento de água bruta traz inúmeros benefícios para a saúde da população e, como qualquer tipo de indústria gera resíduos, provenientes do processamento das matérias-primas. Este resíduo gerado em ETAs é classificado como resíduo sólido pela NBR 10004 e seu lançamento nos corpos d'água é regulado pela resolução CONAMA Nº357.

De acordo com a ASCE e AWWA (1996) apud DI BERNARDO (2008) os resíduos de ETAs podem ser divididos em 4 categorias: i) lodo gerado na descarga dos decantadores, removidos em flotadores, na lavagem de filtros, no abrandamento e na remoção de ferro e manganês da água bruta; ii)concentrado salino: resultante do tratamento de água por técnicas de membrana , osmose reversa, eletrodiálise e troca iônica; iii) carvão ativado e resinas de troca iônica desgastadas e material filtrante usado; e iv)emissões gasosas de unidades de controle de odor ou técnicas de *air stripping*. Segundo CORNWELL et al(1987) Apud DI BERNARDO(2008) os resíduos gerados na lavagens dos filtros e descarga dos decantadores são os mais representativos nas ETAs .

Alguns estudos foram realizados por pesquisadores pelo Brasil para conhecer as características químicas de alguns resíduos gerados em ETAs devido à necessidade de identificar e quantificar os compostos que podem contribuir para danificar o meio

ambiente e causar problemas á saúde da população. Alguns destes dados serão apresentados nas tabelas 2.1 e 2.2:

Tabela 2.1. Dados de lodos de decantadores de algumas ETAs da RMSP.

Parâmetro	Guaraú	ABV	Rio Claro	Rio Grande	Teodoro Ramos	Alto Cotia
Alumínio(mg/Kg)	65386	7505	6690	83821	123507	95541
Cobre((mg/Kg)	1109	1109	14833	25	2.791	<5
Ferro(mg/Kg)	32712	281508	449774	32751	41259	30080
Fluoreto(mg/Kg)	152	86	150	42	46	38
Manganês(mg/Kg)	3146	1684	6756	136	5181	453
Sódio(mg/Kg)	6609	1027	41482	563	3222	433
Zinco(mg/Kg)	59	57	75	47	145	66
Sólidos Suspensos(mg/L)	24957	17412	14486	11043	11043	10692

nd:não detectado; e nm:não medido.

Fonte: Adaptado de DI BERNARDO,2008 ,p950

Tabela 2.2. Dados de descargas de decantadores de algumas ETAs de SP.

Parâmetro	ETAs		
	São Carlos	Rio Claro	Araraquara
Alumínio (mg/Kg)	11100	30	2,16
Cobre (mg/L)	2,06	0,91	1,7
Ferro solúvel (mg/L)	5000	4200	214
Chumbo (mg/L)	1,6	1,26	ND
Cromo total (mg/L)	1,58	0,86	0,19
Níquel (mg/L)	1,8	1,16	ND
Zinco (mg/L)	4,25	1148,5	0,1
Sólidos suspensos (mg/L)	26520	15330	775

ND:não detectado

Fonte: Adaptado de DI BERNARDO,2008,p950

Como os resíduos de ETAs podem ter várias fontes e podem sofrer inúmeros processos, tais como: secagem natural, desidratação em equipamentos, adição de coagulantes, podendo concentrar os seus constituintes, alguns estudiosos optam por realizar estudos de caracterização em lodos após tratamentos térmicos.

A Tabela 2.3 apresenta a composição química do resíduo seco da ETA Campo do Goytacazes, no Rio de Janeiro.

Tabela 2.3. Composição Química do Resíduo seco em estufa da ETA Goytacazes.

Composição	% em peso
SiO_2	39,92
Al_2O_3	31,71
Fe_2O_3	12,79
TiO_2	1,10
MnO	0,09
MgO	0,37
CaO	0,10
K_2O	0,58
Na_2O	0,06
P_2O_5	0,35
Perda ao Fogo	16,93

Fonte: OLIVEIRA et al, 2004

Depois de analisarmos as tabelas apresentadas podemos perceber que as características dos resíduos variam muito de uma estação de tratamento para outra e variam também em função da unidade geradora do lodo na ETA.

Segundo DI BERNARDO (2008), a quantidade e a qualidade dos resíduos produzidos em uma ETA dependem de vários fatores, destacando-se: i) qualidade da água bruta e tecnologia de tratamento; ii)características da coagulação:tipo de dosagem do coagulante e do alcalinizante ou acidificante; iii) uso, característica e dosagem do auxiliar de coagulação(floculação ou filtração); iv)uso de oxidante e adsorvente (carvão ativado pulverizado); v)método de limpeza dos decantadores (ou flotadores); vi)técnica de lavagem dos filtros; vii) habilidade dos operadores; viii) automação de processos e operações na ETA; e ix) reuso da água recuperada no sistema de tratamento.

Podemos afirmar que é muito importante conhecer as características dos efluentes gerados nas estações de tratamento de água para poder utilizar uma concepção adequada de unidade de tratamento destes resíduos e, posteriormente, encontrar uma alternativa de disposição tecnologicamente e economicamente viável e que respeite o meio ambiente.

OLIVEIRA et al (2004) cita que a indústria de cerâmica vermelha é altamente promissora para absorver resíduos poluentes . Isto é decorrente principalmente do fato que as massas argilosas utilizadas são por natureza heterogêneas. As massas argilosas são materiais poliminerálicos constituídos de argilominerais (materiais plásticos) e minerais não argilosos (materiais não plásticos), com ampla variação mineralógica, física e química. De forma que as massas argilosas para cerâmica vermelha são tolerantes e aceitam a presença de materiais residuais de diversos tipos e origens, mesmo quando adicionados em quantidades significantes (OLIVEIRA et al, 2004).

Nesta dissertação a alternativa de disposição em estudo é o reaproveitamento do Resíduo (lodo) de ETA na Indústria de Cerâmicas vermelhas.

2.5 ARGILAS COMO MATÉRIA-PRIMA PARA INDÚSTRIAS QUÍMICAS

De acordo com SANTOS (1975) o grande número de usos industriais das argilas não é uma causa e sim uma conseqüência de um conjunto de fatores que são específicos para as argilas e que outras rochas não possuem simultaneamente. Estes fatores são os seguintes:

1. As argilas são constituídas por argilominerais, os quais compreendem vários grupos, que incluem diversas espécies mineralógicas.
2. As diversas espécies mineralógicas apresentam composições químicas diferentes, quer devido às estruturas cristalinas, quer devido às substituições isomórficas, quer devido aos cátions trocáveis.
3. As diversas espécies mineralógicas apresentam propriedades fisicoquímicas variando numa ampla faixa de valores.
4. As argilas são rochas naturalmente subdivididas, isto é, não precisam ser moídas para se obter a individualização das partículas já naturalmente menores que 44μm.
5. As argilas, sendo produto de alteração de rochas por ação de intemperismos deutérico ou hidrotermal e depois transportadas, são constituintes de sedimentos flúvio-lacustres, por isso estão frequentemente próximas às comunidades humanas atuais; isto é , onde há água superficial , há argilas em quantidade.
6. As indústrias químicas de processo exigem matérias-primas de propriedades as mais constantes possíveis (isto é, com pequeno desvio-padrão em torno da média aritmética); ora, as argilas podem ocorrer em depósitos grandes e bastantes homogêneos, apesar da possível variabilidade em propriedades; as

impurezas são facilmente separáveis porque têm, geralmente, uma granulometria bastante acima da peneira USS n 325.

7. As argilas são facilmente dispersáveis em água (e outros solventes) podendo dar suspensões quer instáveis, quer estáveis, com uma faixa ampla de propriedades reológicas.

Ainda, segundo SANTOS (1975), esse conjunto de propriedades torna as argilas matérias-primas com amplas possibilidades de aplicação industrial, além de serem abundantes e geralmente próximas à grupos humanos e possuírem granulometria extremamente fina ou elevada área específica. Em suma: são matérias-primas de amplas possibilidades de utilização industrial e muito baratas.

2.6 PROCESSAMENTO DE CERÂMICAS VERMELHAS

2.6.1 Classificação de Materiais Cerâmicos

Segundo CALLISTER (2008) "cerâmica é um composto formado por elementos metálicos e não metálicos para o qual a ligação interatômica é predominantemente iônica" (CALLISTER, 2008).

No Brasil a classificação da cerâmica é orientada pela *Associação Brasileira de Cerâmica*,que subdivide o setor cerâmico em segmentos, em função de fatores, como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização.

Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA(ABC, 2010) os materiais cerâmicos são classificados da seguinte forma :

Cerâmica Vermelha

Compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno. As lajotas muitas vezes são enquadradas neste grupo, porém, o mais correto é em Materiais de Revestimento.

Materiais de Revestimento (Placas Cerâmicas)

São aqueles materiais, na forma de placas usados na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas de ambientes internos e externos. Recebem designações tais como: azulejo, pastilha, porcelanato, grês, lajota, piso, etc.

Cerâmica Branca

Este grupo é bastante diversificado, compreendendo materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor e que eram assim agrupados pela cor branca da massa, necessária por razões estéticas e/ou técnicas. Com o advento dos vidrados opacificados, muitos dos produtos enquadrados neste grupo passaram a ser fabricados, sem prejuízo das características para uma dada aplicação, com matérias-primas com certo grau de impurezas, responsáveis pela coloração (ABC,2010).

A tabela 2.4 relaciona os setores cerâmicos, seus produtos, matérias primas utilizadas e seu processo de fabricação.

Tabela 2.4. Dados da Indústria de Cerâmica Vermelha

CLASSIFICAÇÃO			PRODUTO	Matéria-prima											Processo de confor-mação				Temperatura de Queima (ºC)					
				Plástica			Não-plástica																	
Tipo de cerâmica*	GRUPO**/ SETOR			Argila comum	Argila plástica	Caulim	Feldspato (***)	Filito	Talco	Calcário	Quartzo	Outros	Moagem via úmida	Moagem via seca	Extrusão	Torneria	Prensagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	>1.200
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)		Cerâmica	Blocos, lajes	P											P									
	1	Vermelha	Telha	P				O							P		P							
			Agregado leve	P								O			P									
			Grés sanitário		P	S	P		O		S	O	P											
		Cerâmica	Porcelana Mesa		P		P				P		P		S	S		O						
	2	Branca	Porcelana Eletr.		P		P				P		P		S	S		O						
			Faiança		P	O	S	S	S	P	S		P					P						
			Pisos rústicos	P	O							O			P									
			Pisos via seca	P										P			P							
	3	Revesti-mentos	Azulejo		P	P			O	S	S		P				P							
			Piso gresificado	O	P	S	S	P	O		S		P		O		P							
			Grês porcelânico		P	S	P		O		S	O	P				P							
Outras	4	Refratários				O					O	P												
	5	Isolantes					O				O	P												
	6	Especiais									O	P												
	7	Cimento		S						P	S	O		P										
	8	Vidro					S			S	P	P												

P Processo ou composição principal (> 20%) S Processo ou composição secundária (< 10%) O Processo ou composição ocasional

Fonte: MOTTA et al, 2001

2.6.2 Considerações sobre Indústria de Cerâmicas Vermelhas

A matéria principal da indústria de cerâmicas vermelhas é a argila.

O conceito de argila que reúne aceitação mais geral considera a argila um produto natural, terroso, constituído componentes de grãos muito fino, entre os quais se destacam por serem fundamentais os materiais argilosos. Este produto natural desenvolve quase sempre, plasticidade em meio úmido e endurece depois de seco e mais ainda depois de cozido (MOTTA et al, 2001).

A argila para tijolo é uma argila grosseira, possuindo quantidade apreciáveis de silte e areia e cores variadas. O teor em fração argiloso é baixo, mais suficiente para permitir o desenvolvimento da plasticidade necessária á moldagem dos corpos cerâmicos. A plasticidade cresce, com a razão minerais argilosos/minerais não argilosos. Este tipo de argila é usada na cerâmica estrutural no fabrico de materiais de construção aplicadas na Engenharia Civil, nomeadamente tijolos maciços, tijolos furados, telhas e pavimentos. Na sua composição, além dos minerais argilosos participam quartzo, mica, fragmentos de rocha, carbonatos em grãos ou concreções, sulfatos, sulfuretos, óxidos e hidróxidos de ferro e matéria carbonácea (MOTTA et al, 2001).

Os produtos de cerâmicas vermelhas são aqueles que têm como característica a cor avermelhada que são aplicados na construção civil representados por tijolos blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas e também utensílios de uso doméstico e de adorno (MOTTA, 2001).

A utilização das argilas nas indústrias é de grande valor econômico. A comercialização das argilas como matérias-primas e dos processos em que participam é uma decorrência natural dessa utilização industrial. Há usos de argilas como material de construção em serviços, por exemplo, na pavimentação de estradas de terra (SANTOS, 1975). A Tabela 2.5 apresenta os números e valores das indústrias que realizam os processos de fabricação de cerâmica vermelha:

Tabela 2.5 Números do Setor – Cerâmica vermelha

Número de Unidades Produtoras(Empresa)	7000
Número Peças/Ano (bloco)	25.224.000
Número Peças/Ano (telha)	4.644.000
Quantidade Produzida (em massa t/ano)	64.164.000
Matéria-prima(argilas)	82.260.000
Produção Média por Empresa (peças/mês)	365.000
Faturamento(R$ bilhões)	4,2
Empregos Diretos	214.000

Fonte: ABC, 2010

A indústria cerâmica é caracterizada por duas etapas, a primária (que envolve exploração e exploração da matéria-prima - a argila) e de transformação (para elaboração do produto final). O fluxograma abaixo apresenta as várias etapas que fazem parte do processo de fabricação de cerâmicas vermelhas.

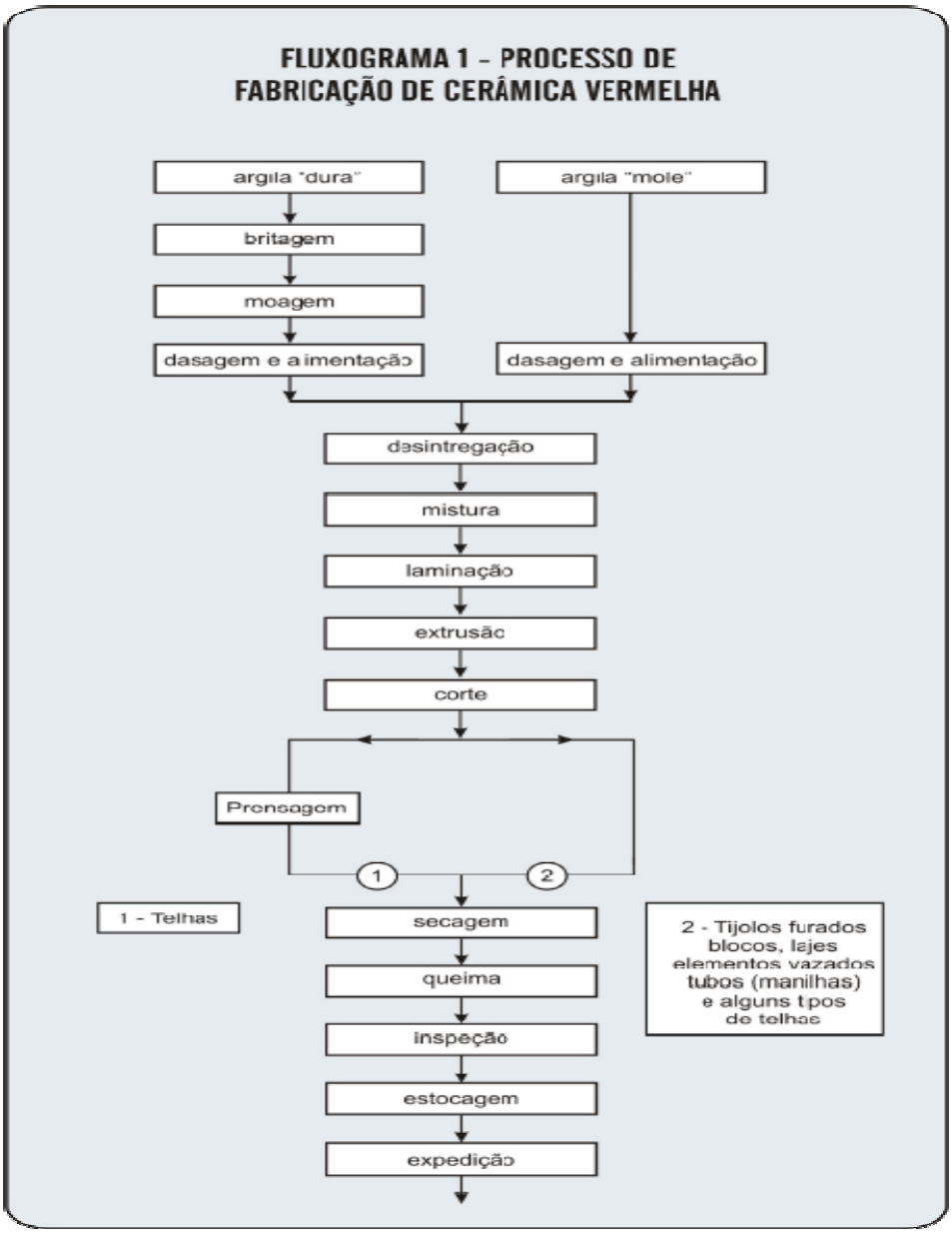

Figura 2.13 Fluxograma da Fabricação de Cerâmica vermelha

Fonte: Fonte: ABC – Associação Brasileira de Cerâmica (2010).

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Para a realização desta dissertação foram utilizados os resíduos (lodo) da Estação de Tratamento de Água de Botafogo, situada na Cidade de Abreu e Lima-Pernambuco. A ETA faz parte das unidades de tratamento de água da COMPESA-Companhia Pernambucana de Saneamento, que cedeu estes resíduos para estudos.

Na realização do trabalho foram utilizados moldes e equipamentos no processamento destes resíduos, aparelhagem pertencente ao Laboratório de Cerâmicas Especiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE-Universidade Federal de Pernambuco, foram utilizados também outros laboratórios da universidade na pesquisa.

3.2 METODOLOGIA

Para o início da pesquisa foi solicitado à Compesa o material da Unidade Piloto de Tratamento de Resíduos da ETA Botafogo. O material (lodo), mostrado na Figura 3.1, passou por processo de secagem e adensamento no geotextil, foi coletado em tambores plásticos fechados com aproximadamente 50 Kg de material e enviado para o Laboratório de Cerâmicas Especiais. Para retirar o material foi necessário abrir o geotextil que estava completamente cheio de material, que se encontra na forma de pedregulhos de vários tamanhos e com coloração avermelhada, conforme mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 Resíduo da ETA antes e depois de secagem no geotextil.

Para realizar a pesquisa com o lodo de ETA foi necessário realizar uma preparação das amostras envolvendo vários procedimentos: secagem do resíduo em

estufa, moagem em moinho de bola, peneiramento em peneiras de várias granulometrias. Depois deste processamento as amostras dos resíduos foram nomeadas da seguinte forma:

- Amostra 1 – Resíduo da 1º secagem e moagem
- Amostra 2 – Resíduo da 2º secagem e moagem

Para garantir a homogeneidade dos resultados, utilizou-se das duas amostras durante toda a pesquisa, de acordo com a metodologia representada na Figura 3.2, que mostra um fluxograma da experiência.

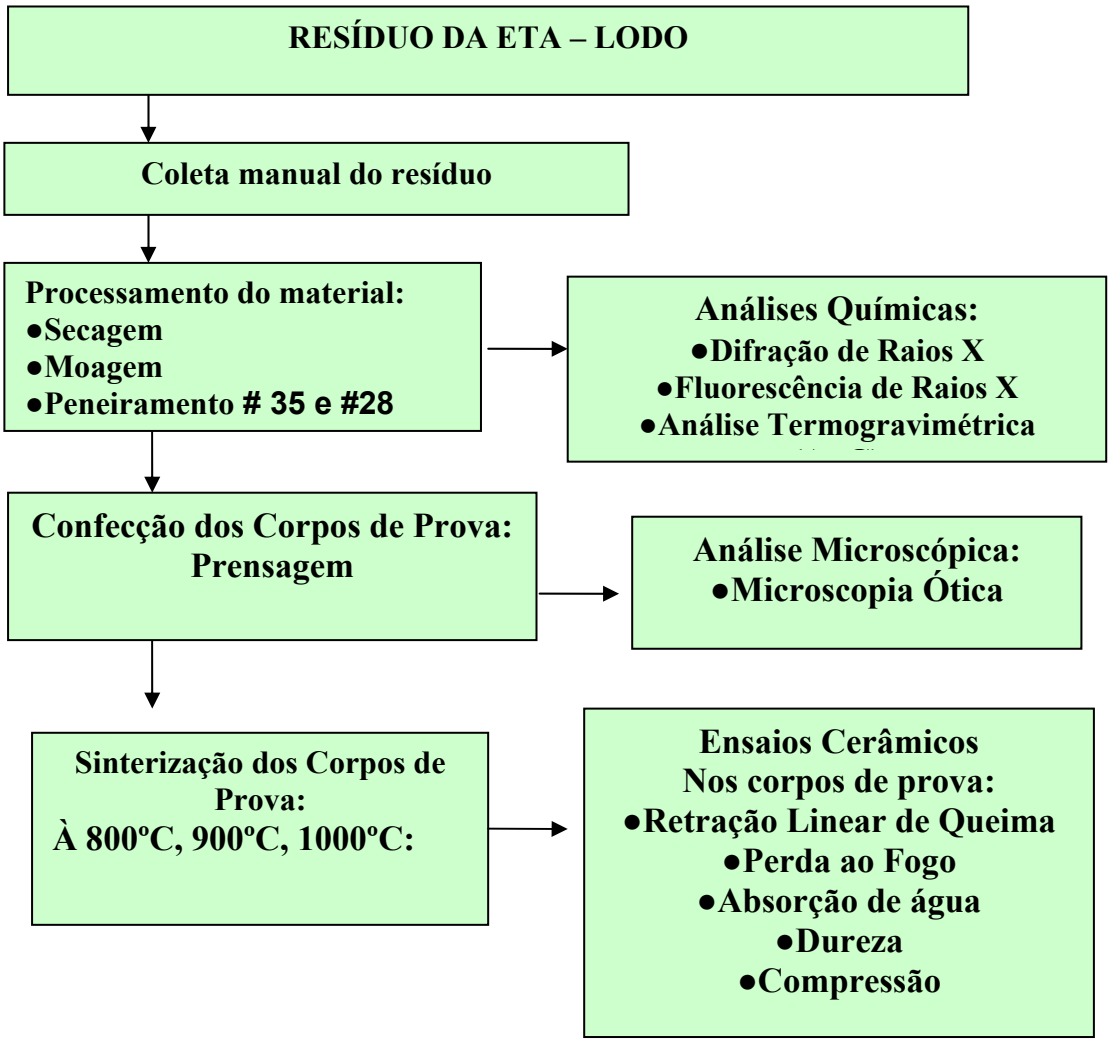

Figura 3.2. Fluxograma da Metodologia de Processamento e Caracterização dos Resíduos da ETA.

Para melhor compreensão o presente trabalho foi desenvolvido em quatro etapas:

1) Preparação das Amostras dos resíduos;
2) Caracterização Química dos resíduos;
3) Confecção dos corpos de prova;
4) Realização dos Ensaios Cerâmicos.

3.2.1 Preparação das Amostras dos resíduos

O resíduo foi retirado do tambor plástico e colocado em cuba metálica e lavado para realizar secagem em estufa (Figura 3.3), a 110 ºC durante 24 horas, no Laboratório Labtermo da UFPE. Depois os resíduos das Amostras 1 e Amostras 2 foram colocados em recipientes plásticos fechados e posteriormente em repouso até que suas temperaturas igualassem à temperatura ambiente.

Figura 3.3 Estufa de secagem (semelhante à usada na experiência)
Fonte:www.cblsoldas.com.br

Depois de realizada a secagem cada amostra foi moída no moinho de bolas Marconi MA-500 (Figura 3.4), do Laboratório de Cerâmicas Especiais, que tem jarro em cerâmica sinterizada de Óxido de Alumínio, durante 24 horas, o qual através de movimentos circulares rápidos no sentido horizontal de jarros sobre rolos motorizados, roletes cilíndricos em alumina são direcionados em sentido contrário contra as paredes internas dos jarros pulverizando o material, gerando uma granulométrica fina.

Figura 3.4. Moinho de Bolas do Laboratório de Cerâmicas Especiais.
Fonte: Laboratório de Cerâmicas Especiais,UFPE

Após a moagem dos resíduos, cada uma das amostras foram peneirados separadamente, primeiro em peneira metálica Nº 30-ABNT (Mesh 28-Abertura 0,600mm) e depois em peneira Nº 40-ABNT (Mesh 35-Abertura 0,425mm) para proporcionar uma correta homogeneização da amostra.. Na Figura 3.5 apresentamos o aspecto visual das duas amostras de resíduo depois de todo o processo de preparação das amostras, que incluíram secagem, moagem e peneiramento.

Figura 3.5 Amostras do resíduo após secagem, moagem e peneiramento.

3.2.2 Analises Químicas dos resíduos

3.2.2.1 Fluorescência de Raios X

Após a preparação das amostras do resíduo, uma parcela de 33g cada amostra seca foi enviada ao Laboratório do Núcleo de Estudos Geoquímicos, do Departamento de Geologia, da Universidade Federal de Pernambuco, para a identificação do resíduo através da analise de fluorescência de raios X.

Esta técnica de análise não destrutiva permite uma análise qualitativa, com a identificação dos elementos presentes na amostra, mais também a análise quantitativa, de modo a estabelecer com que percentual de cada elemento (ou substância) encontra-se presente na amostra (ALBUQUERQUE, 2009).

As amostras de resíduos foram analisadas no Laboratório do Núcleo de Estudos Geoquímicos da Universidade em espectrômetro de fluorescência de Raios-X Rigaku modelo RIX 3000 (Figura 3.6), equipado com tubo de Rh, com os resultados das análises expressos em peso %. Para realização da análise cada amostra foi feita uma pastilha prensada com 30 toneladas de força.

Figura 3.6 Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (semelhante ao usado no experimento)

Fonte: Laboratório de Caracterização por Raios X, UNICAMP

3.2.2.2 Difração de Raios X

O difratograma é um gráfico da intensidade da radiação espalhada em função do ângulo de espalhamento. Com os valores dos ângulos de cada um dos máximos de intensidade e utilizando um programa de cálculo simples e a lei de Bragg são determinadas as correspondentes distâncias interplanares (d), que identificam a estrutura cristalográfica (ALBUQUERQUE, 2009).

Para a realização da análise de difração de Raios X foi enviado uma amostra de 17g para o Laboratório de Difração de Raios – X do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE . Utilizando-se um difratômetro SHIMADZU XRD-6000, Figura 3.7, com radiação de Cu, Kα = 1.54060 Å, utilizando os limites de ângulo de varredura $10° < 2\theta < 90°$. O XRD-6000 soluciona problemas analíticos usuais, desde análises qualitativas de rotina, análises quantitativas de fases, e análises cristalográficas mais exigentes (SHIMADZU,2010).

A difração de raios – X, utilizando aparelhos como o SHIMADZU, pode ser utilizada como método de pesquisa científica visando várias aplicações na engenharia de Materiais, tais como: identificação de fases cristalinas, quantificação de fases cristalinas, quantificação de soluções sólidas, análises de estrutura microcristalina, determinação de microtensões e tamanho de cristais, percentual de cristalinidade, análise de filmes finos, análise de tensões residuais, etc (SHIMADZU,2010).

Desta forma esta técnica é uma das mais usadas para identificar a estrutura de materiais cristalinos, além de poder identificar, de forma qualitativa, os materiais cristalinos.

Figura 3.7 Difratômetro de Raios-X

Fonte: www..shimadzu.com.br

3.2.2.3 Análise Termogravimétrica (ATG)

A Análise Termogravimétrica é a técnica na qual a massa de uma substância é medida em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação controlada. A TGA pode ser utilizada para várias aplicações, tais quais; decomposição térmica de compostos orgânicos, inorgânicos e biológicos, determinação de unidade e composição de cinzas, destilação e evaporação de líquidos, reações no estado sólido que liberam produtos voláteis, destilação e evaporação de líquidos, corrosão de materiais em várias atmosferas, etc.

O equipamento utilizado na análise termogravimétrica é basicamente constituído por uma microbalança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás. Na pesquisa esta análise foi realizada em equipamento Marca Shimadzu modelo TGA-50H, semelhante à Figura 3.8, do Laboratório Associado de Nanodispositivos Fotônicos do Departamento de Química Fundamental. No experimento foi utilizado um cadinho de platina pura e as condições foram: fluxo de 50mg/L de N2, taxa de aquecimento de 10ºC/min. de 20ºC até 900ºC.

Figura 3.8 Microbalança de ATG

Fonte: www..shimadzu.com.br

3.2.2.4 Microscopia Óptica

A Microscopia Óptica é uma técnica bastante utilizada para a observação da estrutura dos materiais e ao longo dos anos com seu aperfeiçoamento a sua atuação tornou-se muito necessária em uma gama de aplicações. O equipamento utilizado é o microscópio óptico e o mesmo apresenta dois sistemas de lentes convergentes; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e que fornece uma imagem real e aumentada do objeto que é observado. A ocular, também formada por lentes convergentes, funciona como uma lupa, que nos dá uma imagem virtual e aumentada da imagem real que se formou pela objetiva. A objetiva e a ocular são dispostas nas extremidades de um cilindro oco, constituindo a coluna do microscópio e que possui a capacidade de se aproximar ou afastar da amostra para que se tenha a focalização perfeita (KINGSLAKE ,1967)

A potência do microscópio é resultado do produto da ampliação linear da objetiva pela potência da ocular; seu valor será elevado quando as distâncias focais da objetiva e ocular forem pequenas. O poder separador, ou distância mínima distinguível entre dois pontos é limitado pela difração da luz. Assim, se o feixe de luz incidente tiver uma abertura angular grande e utilizarmos lentes de inversão, o poder separador será melhorado, pois elimina-se difração das bordas da lente.

As análises de microscopia óptica foram realizadas no Microscópio Óptico metalúrgico Olympus BX51M, com câmera digital AC30 acoplada, no Laboratório de Microscopia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE.

Figura 3.9 Microscópio Óptico do Laboratório de Microscopia do DEM-UFPE.

3.2.3 Confecção dos corpos de prova

Foram produzidas duas amostras de resíduos e de cada amostra foram confeccionados alguns corpos de provas cilíndricos através de prensagem hidráulica utilizando moldes cilíndricos metálicos. No início do processo de pastilhamento, os resíduos foram colocados em moldes cilíndricos de 30 mm de diâmetro para depois serem prensados. Os moldes foram limpos com acetona e antes da colocação do resíduo foi utilizada pequena quantidade de etileno glicol como desmoldante, para facilitar a retirada do corpo de prova do molde metálico. Para realizar a prensagem foi usada uma prensa hidráulica MARCON - MPH-15, Figura 3.10, utilizando um molde metálico com 30 mm de diâmetro, e tendo sido utilizada uma Pressão de Compactação de 10 toneladas por centímetro quadrado em cada amostra, por 10 minutos.

Figura 3.10 Prensa hidráulica de 15 toneladas MARCON - MPH-15
Fonte: Laboratório de Cerâmicas Especiais, UFPE

Foram confeccionados a cada prensagem 10 corpos de prova, sendo 5 do resíduo da amostra 1 e 5 da amostra 2, para sinterização em cada condição de temperatura. No total foram gerados 40 corpos de provas cilíndricos. No entanto os últimos 10 corpos de prova foram prensados com Pressão de 2 ton/cm^2 e depois submetidos a tratamento, pulverizados em pistilo de ágata e novamente pastilhados e prensados com a pressão usual do experimento de 10 ton/cm^2.

Depois de prensados os corpos de prova foram submetidos à sinterização em forno mufla Marca Jung modelo LF0612, nas temperaturas de 800ºC, 900ºC e 1000ºC, durante 24 horas em cada amostra. Contudo os últimos 10 corpos de prova (5 da

amostra 1 e 5 da amostra 2) foram , primeiramente, sinterizados com temperatura de 600ºC, moídos em pistilo de ágata, prensados novamente e submetidos ao forno com temperatura de 1000ºC.

Os corpos de prova foram analisados com relação às seguintes propriedades: retração linear de queima, absorção de água e perda ao fogo. Também foram realizados ensaios cerâmicos para determinar as seguintes propriedades mecânicas: Microdureza Vickers e Resistência à Compressão. Os ensaios estão de acordo com ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação: NBR 15270. Os parâmetros para cada ensaio realizados estão na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1. Parâmetros avaliados nos ensaios cerâmicos com os corpos de prova .

Ensaios	**Temperatura que o corpo de prova foi submetido antes do ensaio**
Retração linear de queima	800° C, 900° C, 1000° C
Absorção de Água	
Perda ao Fogo	
Microdureza Vickers	
Resistência à Compressão	

3.2.4 Ensaios Cerâmicos

3.2.4.1 Retração Linear (RL)

O ensaio de retração linear de queima consiste em avaliar o percentual de redução de comprimento linear do corpo de prova. O valor de retração será positivo quando houver retração e negativo quando houver expansão, em cada temperatura a qual cada corpo de prova foi submetido.

A Figura 3.11 ilustra a representação esquemática do formato do corpo de prova obtido por prensagem em molde metálico. No ensaio o diâmetro do corpo de prova é medido logo após ser retirado do molde ($\mathbf{D_M}$) e após a queima ($\mathbf{D_Q}$). Os resultados foram lançados na Equação 3.1, e determinados os valores de retração linear para cada corpo de prova nas temperaturas usadas nas sinterizações.

Equação 3.1 determina a Retração Linear de Queima:

$$RLQ\ (\%) = \frac{D_M - D_Q}{D_M} \times 100 \quad (3.1)$$

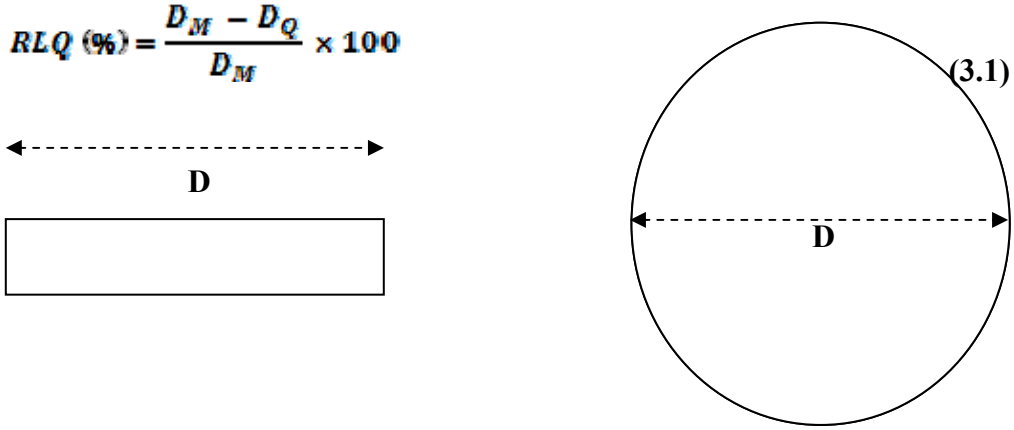

Figura 3.11 Corpo de Prova de Retração Linear Conformado por Prensagem

3.2.4.2 Perda ao Fogo (PF)

Esse ensaio tem por objetivo determinar o percentual de material em peso (água, matéria orgânica, etc) que foi perdido da amostra durante a etapa de queima. O ensaio é realizado no mesmo corpo de prova da retração linear, com as pesagens feitas após a retirada do molde ($\mathbf{P_M}$) e após queima ($\mathbf{P_Q}$) em uma balança Marte Modelo A10K do Laboratório de Cerâmicas Especiais. Através da Equação 3.2 podemos determinar os valores de PF.

$$PF\ (\%) = \frac{P_M - P_Q}{P_M} \times 100 \quad (3.2)$$

3.2.4.3 Absorção de Água (AA)

O ensaio de absorção de água calcula o percentual de água absorvida pelo corpo de prova queimado nas várias temperaturas e através deste valor podemos avaliar a porosidade do material e o nível de sinterização a cada temperatura.

Para esse ensaio é utilizado o mesmo corpo de prova da retração linear queimado, pesa-se a amostra seca ($\mathbf{P_1}$), que passou por secagem em estufa (a 110ºC), em seguida o corpo de prova é imerso em um recipiente com água, onde se eleva a temperatura da água até seu ponto de ebulição, permanecendo por 2 horas em fervura. Após esse tempo, retira-se a amostra da fervura, retira-se o excesso de água no corpo de prova com um pano úmido e pesa-se novamente ($\mathbf{P_2}$), ou seja, o corpo de prova saturado. Aplicam-

se os valores das pesagens na Equação 3.3 e encontra-se o valor para AA das amostras. O ensaio foi realizado de acordo com a Norma NBR 15270.

$$AA = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \quad \textbf{(3.3)}$$

A norma citada estabelece uma faixa de variação para a Absorção de Água para Blocos cerâmicos de alvenaria entre 8% e 22%.

3.2.4.4 Microdureza Vickers

È propriedade relacionada com a resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. A dureza depende diretamente das forças de ligação entre os átomos, íons ou moléculas e do estado do material (processo de fabricação, tratamento térmico, etc) (DINIZ, 2000).

No estudo foi utilizada a Dureza Vickers, cuja metodologia utiliza uma pirâmide de diamante com ângulo de 136º, que é comprimida com uma força arbitrária F, contra a superfície do metal. Calcula-se a área A da superfície impressa pela medição das suas diagonais. A dureza Vickers (**HV**) será dada pela fórmula 3.4, sendo **F** a força aplicada, **A** área da superfície aplicada, e $\mathbf{d_1}$ e $\mathbf{d_2}$ as diagonais (DINIZ,2000):

$$HV = \frac{F}{A} \approx 0,1891 \times \frac{F}{d^2} \quad \textbf{(3.4)}$$

Sendo o parâmetro d determinado pela fórmula 3.5:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \textbf{(3.5)}$$

Neste experimento os corpos de prova foram polidos em máquina de polimento com lixas e depois foram submetidas ao ensaio no Durômetro HVS-5 (Figura 3.12), pertencente ao Laboratório de Cerâmicas Especiais.

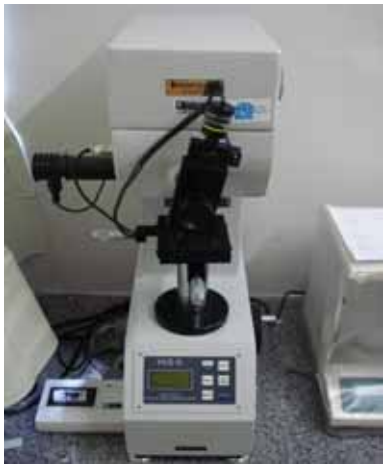

Figura 3.12 Durômetro do Laboratório de Cerâmicas Especiais

3.2.4.5 Resistência à Compressão

Nos testes de resistência à compressão é determinada a força, a uma velocidade de deformação constante, necessária para comprimir ou romper um corpo de prova colocado entre duas placas paralelas controladas. Através deste ensaio podemos estimar o comportamento do material quando for submetido a esforços mecânicos.

O ensaio é realizado em máquinas específicas denominadas prensas hidráulicas, como mostra a Figura 3.13. Os corpos de prova foram polidos de modo a eliminar rebarbas e a manter os dois lados das amostras paralelas, para isso foram utilizadas máquinas de polimento com lixas, posteriormente os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de Resistência à compressão no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE.

Figura 3.13. Prensa Hidráulica

Fonte: www.luxor.ind.br

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ETA (LODO)

4.1 **Análises Químicas**

4.1.1 **Fluorescência de Raios-X**

O resultado da análise por Fluorescência de Raios-X feito na amostra 1 do resíduo ,seco em estufa, do Tratamento de água da ETA Botafogo está exposto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Análise Química do Resíduo da Estação de Tratamento de Água de Botafogo.

ELEMENTOS	AMOSTRA
Fe_2O_3	37,70
Al_2O_3	33,80
SiO_2	24,10
SO_3	1,45
TiO_2	1,08
P_2O_5	0,46
K_2O	0,45
MgO	0,29
MnO	0,28
CaO	0,15
I	0,11
Cr_2O_3	0,03
ZrO_2	0,03
ZnO	0,02
Br	0,02
NiO	0,01
CuO	0,01
Ga_2O_3	0,01
SrO	0,01
Nb_2O_5	0,01
TOTAL	100,01

A amostra de resíduo apresentou elevados percentuais de óxidos refratários Al_2O_3 e SiO_2, no entanto o grande percentual de Alumínio era esperado (33,80%) devido à utilização de Composto de alumínio [$Al_2(SO4)_3$ e Policloreto de Alumínio] no processo

de coagulação da água. A quantidade sílica presente é proveniente do leito dos rios, pois é o constituinte principal da areias e silte carreados pelas águas dos rios e mananciais.

O percentual encontrado de Fe_20_3 foi muito alto e provavelmente deve-se a altos valores de Ferro nas águas de algum dos mananciais que abastecem à ETA.

Outros óxidos foram encontrados em menores percentuais: SO_3(1,45%), TiO_2(1,08%), P_2O_5 (0,45%), óxidos alcalinos K_2O(0,45%), óxidos alcalinos terrosos; MgO(0,29%) , MnO (0,28) , CaO(0,15%) e outros em proporções mínimas.

4.1.2 **Difração de Raios X**

As informações obtidas através da técnica de difração de Raios X serviram para a identificação de alguns dos minerais presentes na amostra 1, e servirão para confirmar a presença de alguns compostos presentes nos resultados apresentados na tabela 4.1 de Fluorescência de Raios X, sendo possível confirmação apenas dos compostos alumina, hematita e sílica. Os corpos de prova, após sinterização nas temperaturas de 800ºC, 900ºc e 1.000ºC (1ª sinterização), foram moídos em pistilo de ágata e encaminhados ao Laboratório de Materiais do ITEP-PE para análises de Raios x.

As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os difratogramas das análises realizadas nos resíduos da amostra 1 nas diferentes temperaturas.

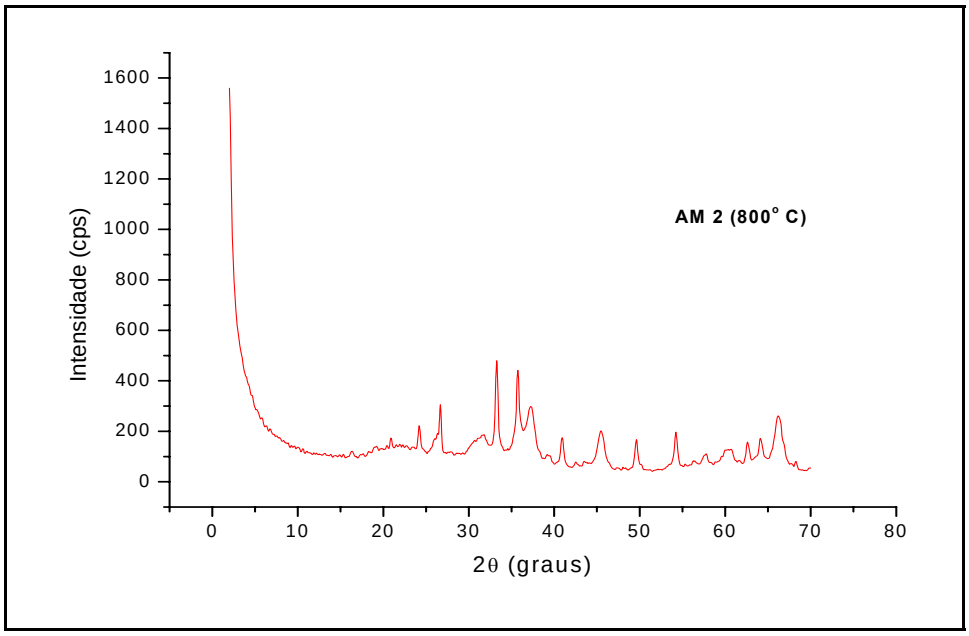

Figura 4.1 Digratograma para amostra a 800ºC.

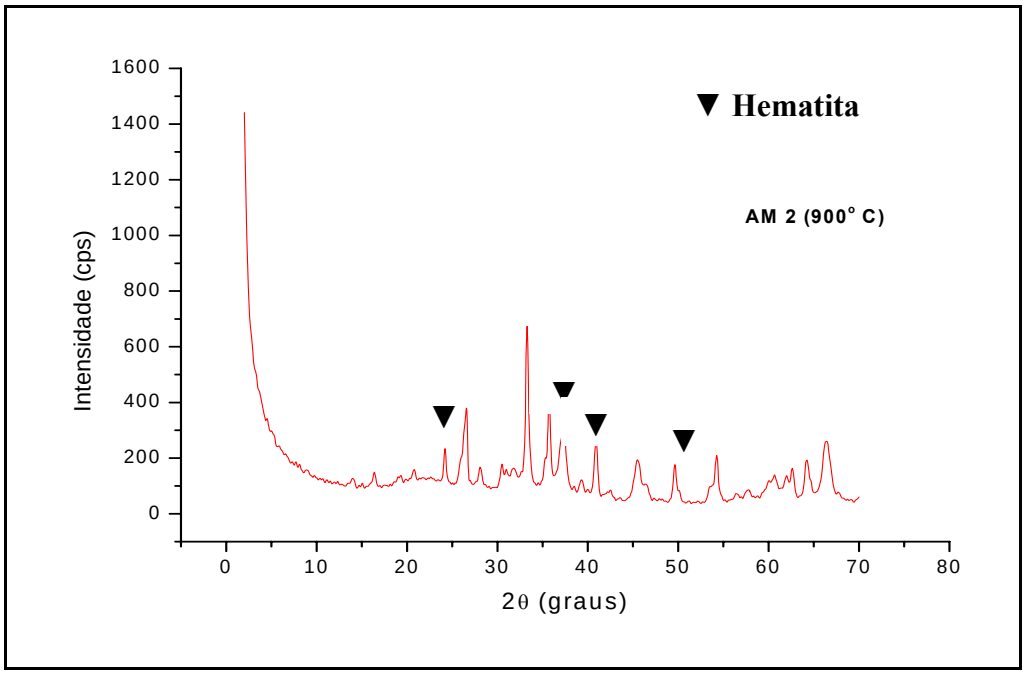

Figura 4.2 Difratograma para amostra a 900ºC.

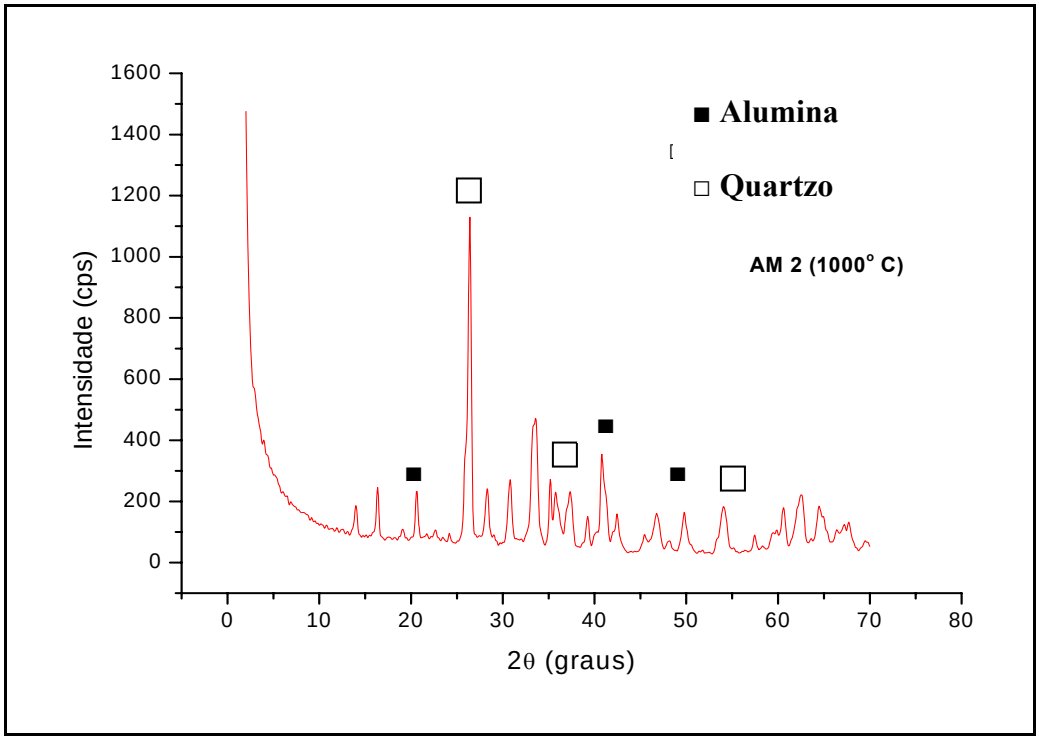

Figura 4.3 Digratograma para amostra a 1.000ºC(1º sinterização).

As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os difratogramas padrões de alguns compostos cristalinos.

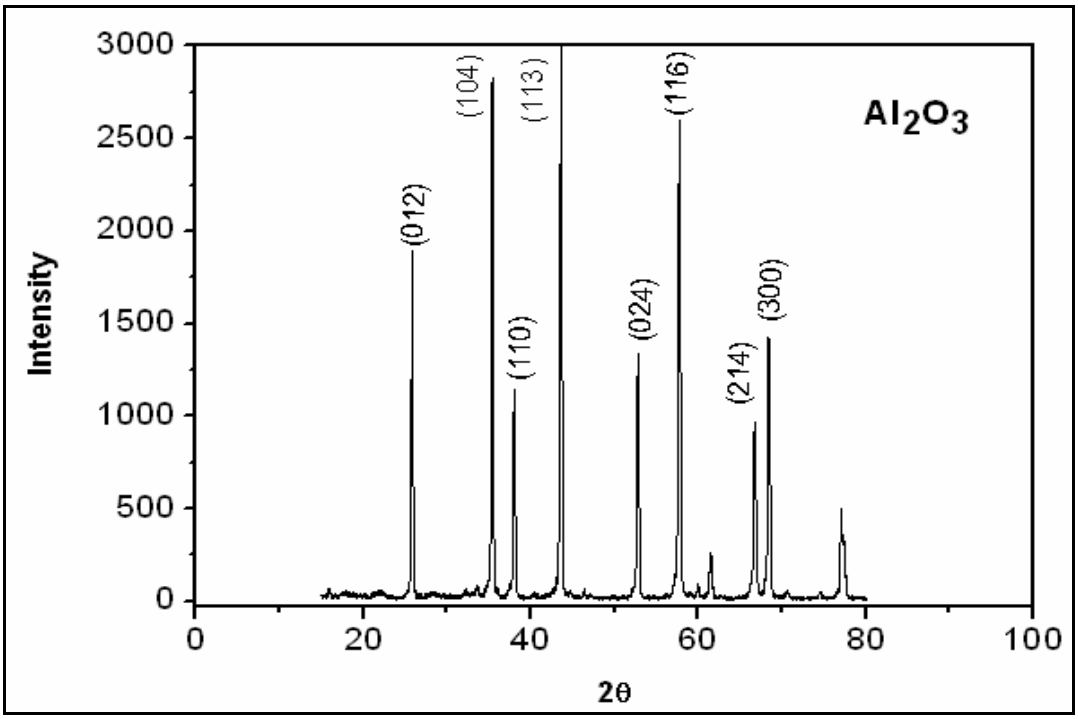

Figura 4.4 Difratograma de Raios X do Al_2O_3.

Fonte: Yadava *et al*, 2008

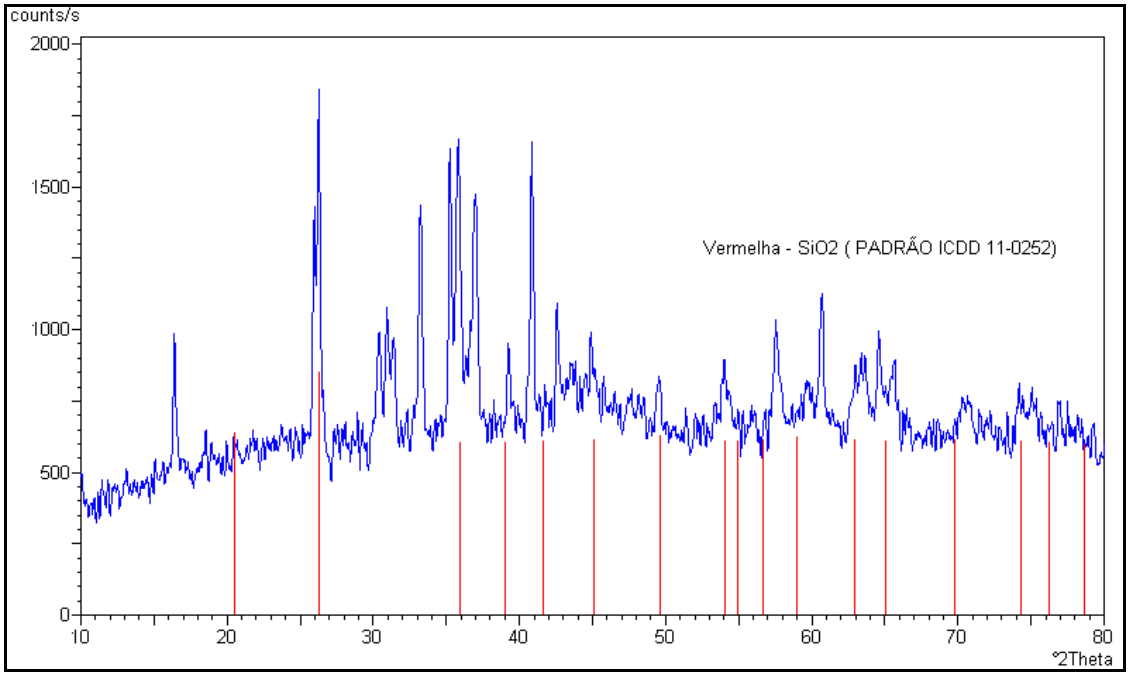

Figura 4.5 Digratograma de Raios X de SiO_2.

Fonte: Portella *et al*, 2003

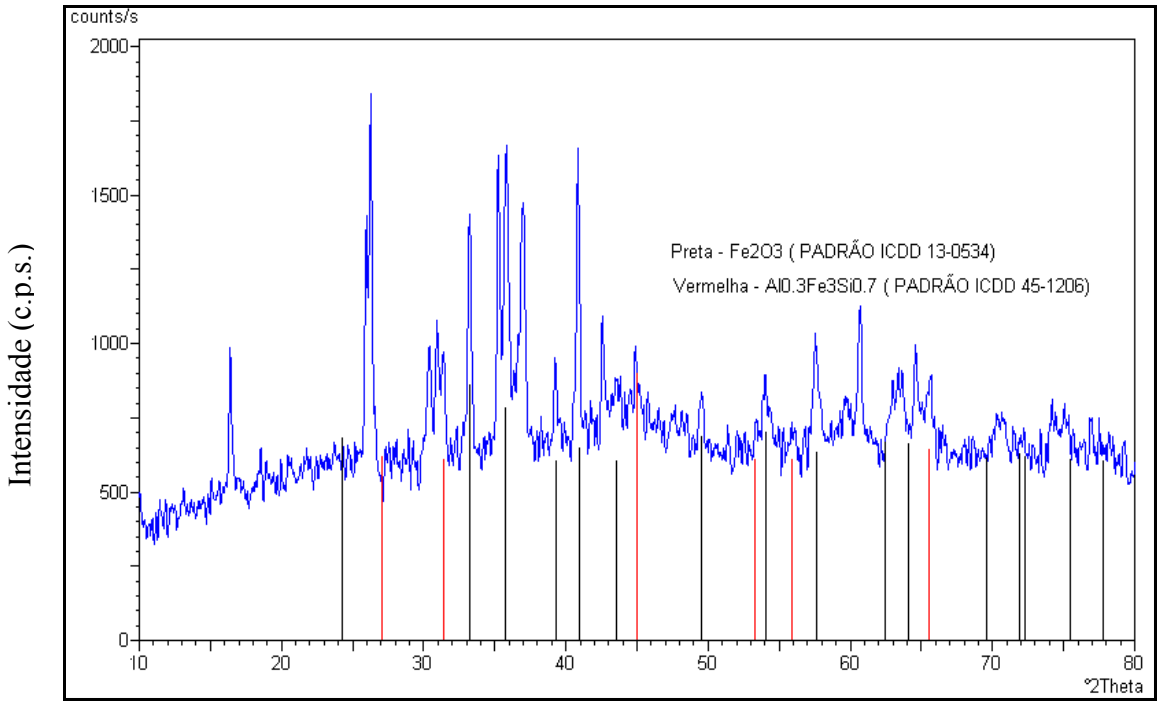

Figura 4.6 Difratograma de Raios X do Fe_2O_3.

Fonte: Portella *et al*, 2003

Após fazer a comparação dos difratogramas da amostra, com os encontrados na literatura e expostos nas figuras 4.4 a 4.6, encontramos as seguintes resultados:

Na figura 4.2 verifica-se que alguns picos correspondem aos da Hematita (Fe_2O_3), evidenciados com base nas posições dos picos no difratograma padrão (Figura 4.6) e compatíveis com a Análises de Fluorescência de Raios X, que aponta como o composto de maior proporção dentro da amostra 1.

Na figura 4.3 verifica-se que alguns picos correspondem aos do Quartzo (SiO_2), baseado nas posições dos picos no Difratograma padrão da Figura 4.5 e que este resultado é evidenciado na Análise de Fluorescência de Raios X , pois a sílica está presente em grande proporção no resíduo.

Analisando a Figura 4.3 verifica-se que alguns picos correspondem aos da Alumina (Al_2O_3), baseado nas posições dos picos no Difratograma padrão da Figura 4.4 e que este resultado é evidenciado na Análise de Fluorescência de Raios X, pois a alumina está presente em grande proporção no resíduo.

Aparecem nos difratogramas outros picos, com menores intensidades, que não correspondem aos picos característicos dos materiais cristalinos evidenciados em maior quantidade na amostra (Hematita, Quartzo e Alumina), no entanto devemos atentar para o fato que resíduo estudado é uma mistura de vários compostos e que contém

impurezas, e que vários destes foram evidenciados na Análise de Fluorescência de Raios X. Outros fatores também podem contribuir para a presença e intensidades dos picos em posições diferentes dos esperados para os 3 compostos citados: tais como granulometria das amostras e orientação preferencial , entre outros.

Os resultados apresentados nas Análises de Difração de Raios X correspondem ao esperado, visto que o resíduo estudado tem em sua composição argilominerais e segundo CALLISTER (2008), as argilas são aluminosilicatos compostos por alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), que contém água quimicamente ligada e tem como mineral mais comum a caulinita [$Al_2(SiO_5)(OH)_4$].

4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

Foram realizadas imagens com aumentos de 50X, 100X, 200X e 500X das superfícies dos corpos de prova sinterizados nas temperaturas de 800ºC, 900ºC, 1.000ºC (1ª sinterização) e 1.000 ºC (2ª sinterização) como mostram as figuras 4.7 e 4.8:

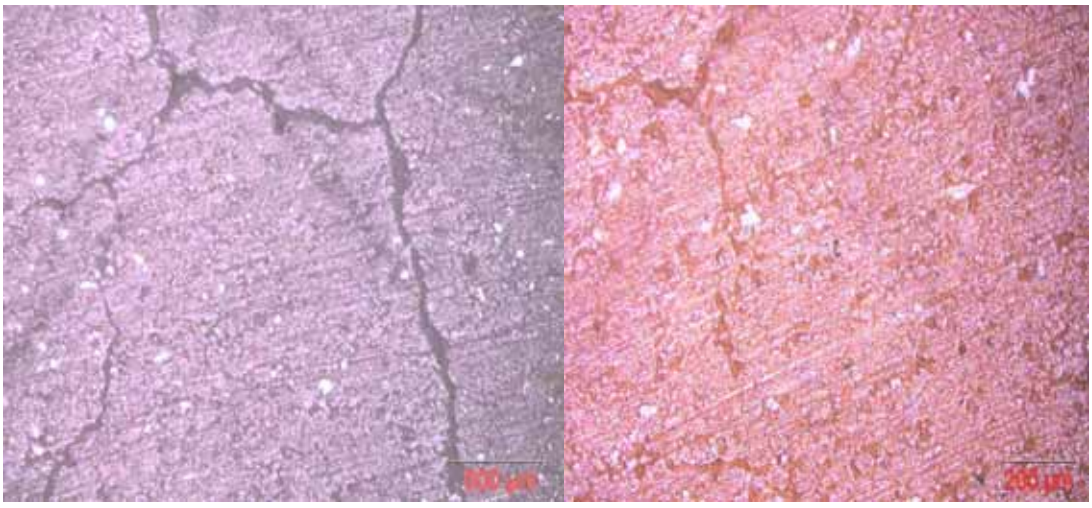

Figura 4.7. Fotografias com aumento de imagem de 50X e 100 x, amostra a 800ºC.

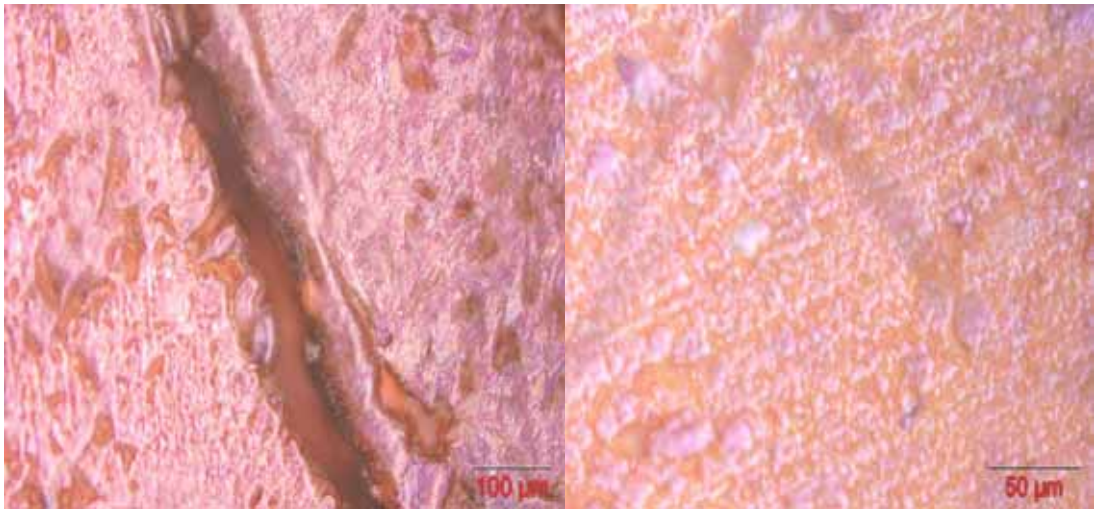

Figura 4.8. Fotografias com aumento de imagem de 200x e 500x, amostra a 800ºC.

As figuras 4.7 e 4.8 mostram que a superfície do corpo de prova apresenta várias trincas em toda a sua superfície e que esta apresenta cristais de vários compostos diferentes, pois podemos visualizar pontos de colorações diferentes ao longo de toda a amostra. As trincas não possuem muita profundidade e não atravessam toda à espessura da pastilha.

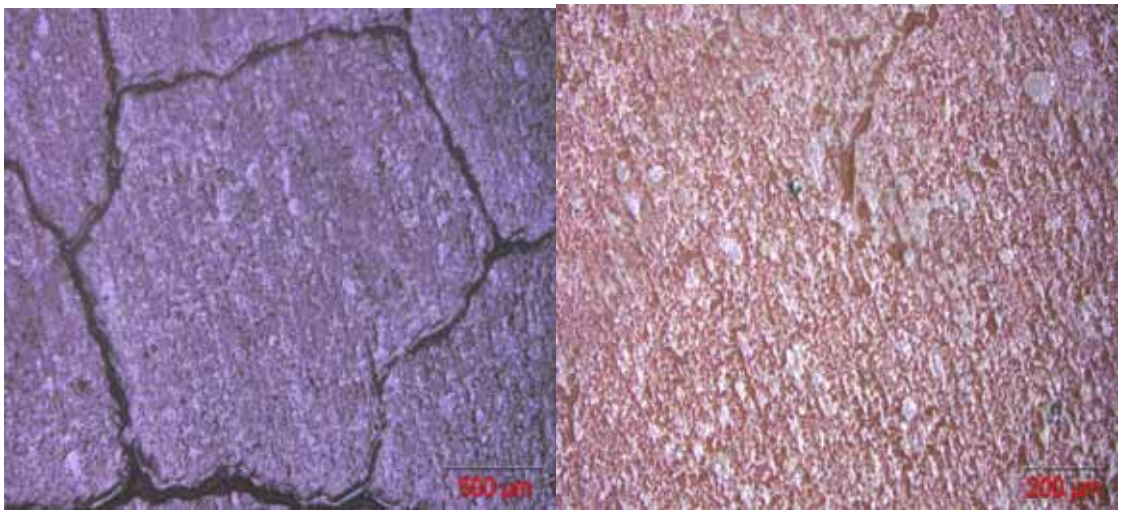

Figura 4.9. Fotografias com aumento de imagem de 50x e 100x, amostra a 900ºC

Figura 4.10. Fotografias com aumento de imagem de 200x e 500x, amostra a 900ºC

As figuras 4.9 e 4.10 mostram que a superfície do corpo de prova a 900 ºC apresenta muitas trincas e fissuras de vários tamanhos em toda a sua superfície. Podemos visualizar cristais de colorações distintas em toda a amostra. A superfície apresenta uma textura menos uniforme, com mais irregularidades e fissuras de vários tamanhos e profundidades do que a amostra a 800ºC.

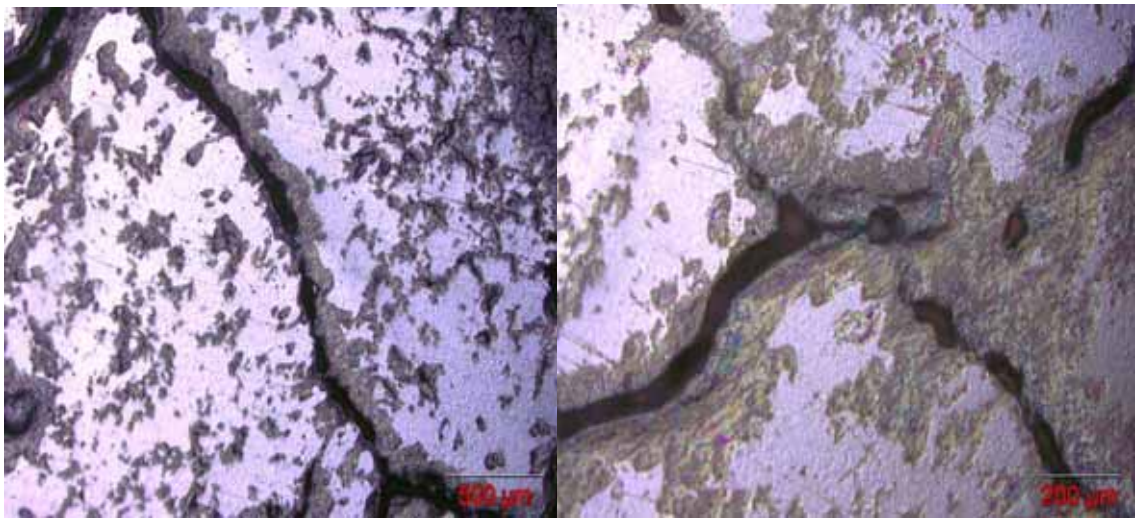

Figura 4.11. Fotografias com aumento de imagem de 50x e 100x, amostra a 1.000ºC(1ª sinterização).

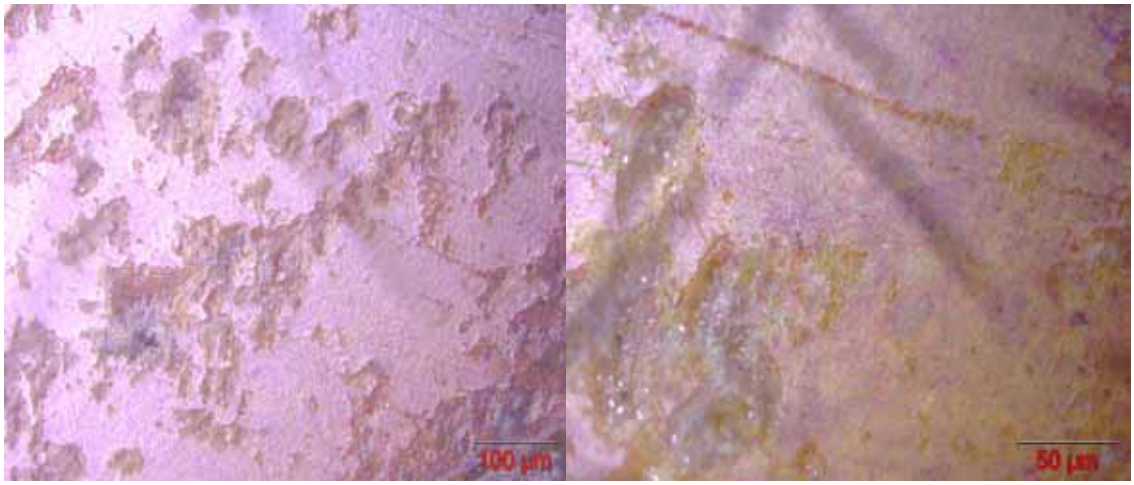

Figura 4.12. Fotografias com aumento de imagem de 200x e 500x, amostra a 1.000ºC (1ªsinterização).

A Figura 4.11 mostra que a superfície do corpo de prova apresenta muitas fissuras de vários tamanhos em toda a sua superfície, que alcançam grande profundidade na amostra, visto que não conseguimos visualizar o fundo das trincas presentes. Nesta figura notamos uma diferença de coloração entre a superfície polida e o interior das trincas, fato que não ocorreu nas outras amostras. Este fato deve-se ao fenômeno de vitrificação que iniciou na superfície devido à temperatura de 1.000ºc utilizada na sinterização, mas não se propagou para o interior da trinca. Segundo Callister (2008), a vitrificação é o fenômeno que consiste na formação gradual de um vidro líquido (fase líquida) que flui para o interior e preenche parte da superfície dos poros.

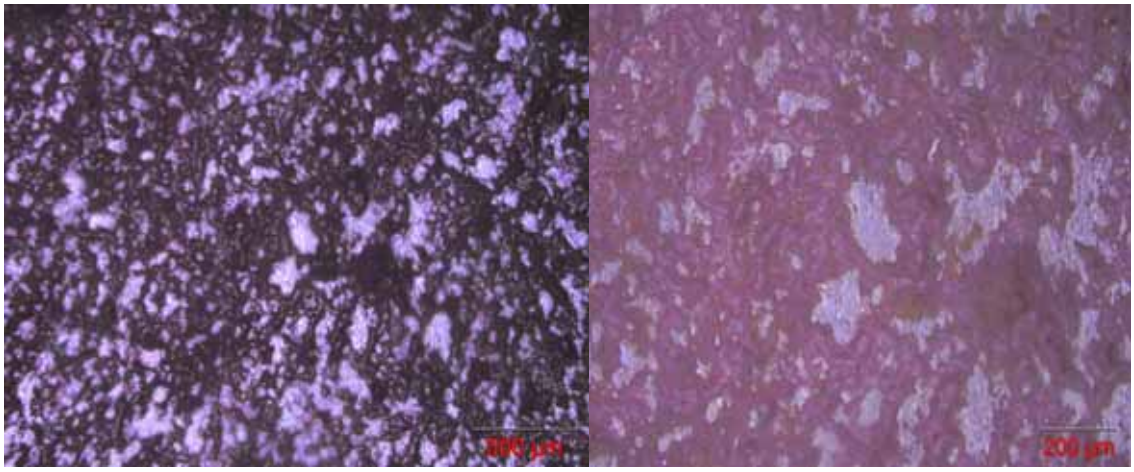

Figura 4.13. Fotografias com aumento de imagem de 50x e 100x, amostra a 1.000ºC(2ªsinterização).

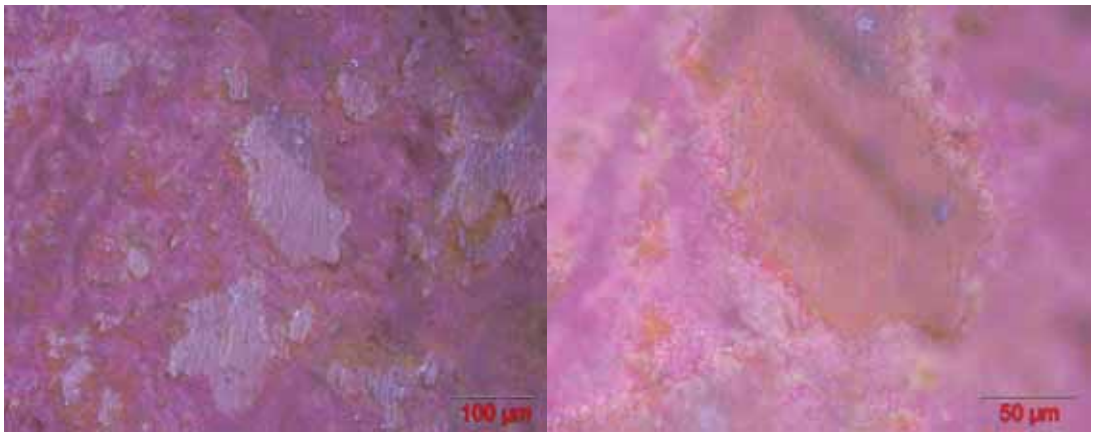

Figura 4.14. Fotografias com aumento de imagem de 200x e 500x, amostra a 1.000ºC (2ªsinterização).

A figura 4.13 mostra que a superfície do corpo de prova apresenta trincas muito pequenas na superfície, com tamanhos e profundidade bem menores que das outras amostras. Na figura 4.14 podemos observar a formação de áreas espelhadas na superfície da amostra, provavelmente devido ao processo de vitrificação destas áreas, porém este mecanismo não se propagou para o interior das pequenas fissuras.

4.3. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.

O resultado da Análise Termogravimétrica (ATG) realizada na amostra do resíduo seco em estufa está exposto na Figura 4. 15.

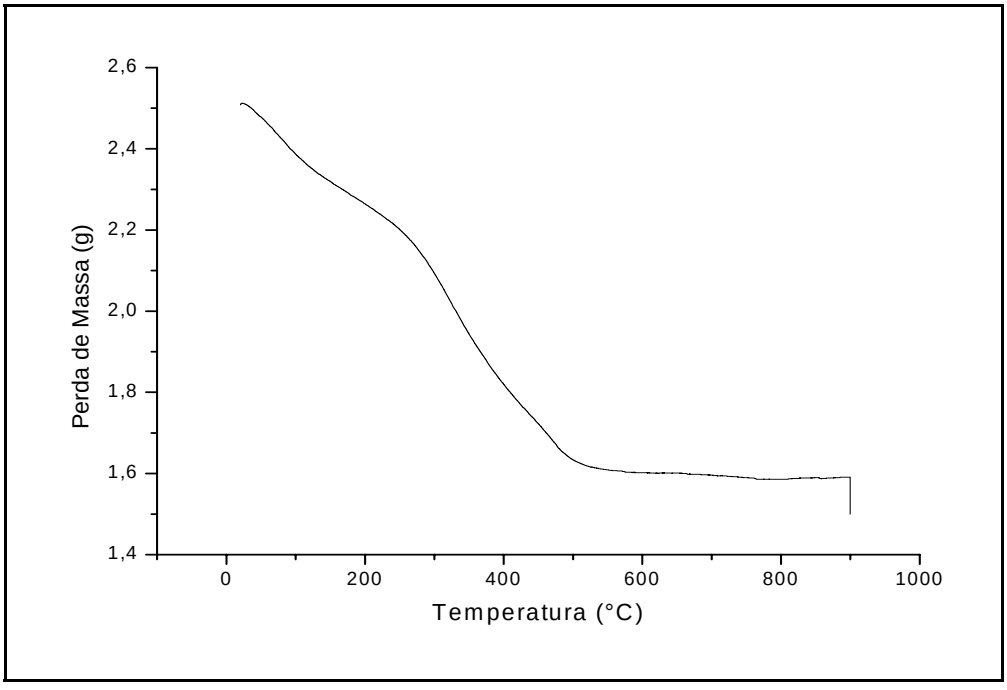

Figura 4.15 Análise Termogravimétrica.

A ATG mostra uma variação de massa ao longo do intervalo de temperatura (de 20ºC a 900ºC), no entanto a grande diminuição de massa ocorre no intervalo de 20ºC até 600ºC, com perda de 36,12% inicial da amostra. No intervalo de 600ºC até 900ºC variação ocorre perda de apenas 0,84% da massa inicial. A massa perdida foi resultante da remoção de água fisicamente adsorvida nos minerais, possivelmente eliminada até 150ºC, segundo SANTOS(1975) , e posteriormente da saída da água quimicamente ligada aos compostos do lodo (aos silicatos hidratados) e da decomposição da matéria orgânica (compostos orgânicos, ácidos húmicos e fúlvicos, microrganismos, etc). No processo de retirada da água quimicamente ligada provavelmente ocorre a desidratação dos hidróxidos presentes na estrutura cristalina e também da água de hidratação presentes entre as camadas da rede cristalinas dos compostos. Segundo CALLISTER (2008), nas estruturas cristalinas dos minerais argilosos prevalece a característica de estrutura em camadas e as moléculas de água se posicionam entre as camadas. A retirada desta água constituinte, quimicamente ligada à rede cristalina continua sendo ser observada no Gráfico de ATG na pequena perda de massa na temperatura entre 600 ºC e 900 ºC.

Devido a estes resultados e às trincas e fissuras nos corpos de prova sinterizados concluímos que os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica produzem forças intermoleculares resultando na fragilização nas estruturas cristalinas dos componentes da amostra. Após analisar este gráfico propusemos sinterizar uma amostra (com 10 corpos de prova) a 1.000ºC cujo material fosse colocado anteriormente no forno à 600ºC, depois moído e prensado, esta amostra foi denominada de 2ª sinterização na temperatura de 1.000ºC.

4.4. ENSAIOS CERÂMICOS

4.4.1 **Retração Linear de Queima a 800ºC, 900ºC e 1.000ºC**

Os corpos de prova foram submetidos à sinterização em forno mufla nas temperaturas de 800ºC, 900ºC e 1.000ºC, sendo que na temperatura mais alta foram realizadas duas sinterizações: a primeira com o resíduo somente seco na estufa e na segunda com secagem, queima à 600ºC, moagem, prensagem e posterior sinterização à 1000ºC. Este procedimento foi realizado devido ao resultado da análise de ATG, que demonstrou intensa perda de massa na temperatura entre 550ºC e 600ºC. Todos os corpos de prova apresentaram coloração marrom (após prensagem e antes do forno) e

coloração avermelhada (após forno) semelhante à argila, provavelmente à grande quantidade de Fe_2O_3 presente, como comprovado na análise de fluorescência de Raios X.

As Figuras de 4.16 a 4.17 apresentam as amostras dos resíduos cerâmicos antes e depois da sinterização na temperatura de 800ºC.

Figura 4.16 Corpos de prova antes de sinterização à 800ºC.

Figura 4.17 Corpos de prova depois de sinterização à 800ºC

Os corpos de prova (pastilhas) sinterizados a 800ºC apresentaram rachaduras em toda a sua superfície, tanto no lado superior e lateral, quanto na base, e a coloração mudou de marrom para vermelho após as 24 horas no forno.

Figura 4.18 Corpos de prova antes de sinterização à 900ºC.

Figura 4.19 Corpos de prova depois de sinterização à 900ºC

Figura 4.20 Corpos de prova antes de 1ª sinterização à 1.000ºC

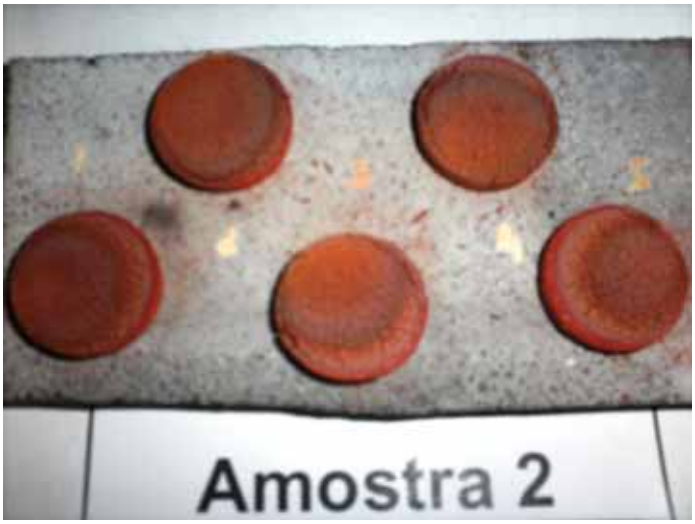

Figura 4.21 Corpos de prova depois de 1ª sinterização a 1.000ºC

Os corpos de prova submetidos à sinterização a 900ºC apresentaram as mesmas características do submetidos à 800ºC: trincas e coloração avermelhada, como mostra a figura 4.19.

As pastilhas da amostra a 1.000ºC(1ªsinterização) apresentaram mais fissuras e trincas do que as anteriores e possuíam, na superfície, uma figura em forma de meia lua de coloração mais clara que o resto da pastilha, como mostra a figura 4.21. A figura em forma de meia lua ocorreu em todas as pastilhas da mesma forma, pois ocorre uma pequena variação de pressão nas bordas do corpo de prova durante a prensagem, de modo que a compactação não é completamente uniforme ao longo da superfície da pastilha, fato comprovado pela pequena variação no formato da superfície superior das pastilhas após a sinterização.

Figura 4.22 Corpos de prova antes da 2ª sinterização à 1.000ºC

Figura 4.23 Corpos de prova depois da 2ª sinterização à 1.000ºC

Os corpos de prova submetidos a 2ª sinterização (1.000ºC) não apresentaram rachaduras, trincas nem nenhum tipo de deformação. A coloração, após forno, ficou avermelhada, no entanto, mais clara que as outras amostras, como mostra a figura 4.23.

As amostras submetidas a 800ºC, 900ºC e 1.000ºC (1ºsinterização) apresentaram rachaduras e trincas devido aos gases resultantes da decomposição da matéria orgânica presente no resíduo e da saída dos vapores da água ligada quimicamente aos compostos. Esta situação não ocorreu com as pastilhas da amostra à 1.000ºC (2ª sinterização), pois foi realizado uma queima anterior na temperatura de 600ºC, depois feita moagem, prensagem e nova sinterização á 1.000ºC. Após o tratamento térmico prévio todos estes compostos voláteis foram retirados da amostra.

Tabela 4.2: Resultados das medições nos diâmetros nas pastilhas sinterizadas à 800ºC.

PASTILHA Nº	DIÂMETRO INICIAL (mm)	DIÂMETRO FINAL (mm)	VARIAÇÃO (mm)	RETRAÇÃO (%)
1	30,0	25,1	4,90	16,3
2	30,0	25,3	4,70	15,7
3	30,0	25,4	4,60	15,3
4	30,0	25,3	4,70	15,7
5	30,0	25,0	5,00	16,7
6	30,0	25,2	4,80	16,0
7	30,0	25,2	4,80	16,0
8	30,0	25,1	4,90	16,3
9	30,0	25,1	4,90	16,3
10	30,0	25,0	5,00	16,7

Tabela 4.3 Resultados das medições nos diâmetros nas pastilhas sinterizadas à 900ºC.

PASTILHA Nº	DIÂMETRO INICIAL (mm)	DIÂMETRO FINAL (mm)	VARIAÇÃO (mm)	RETRAÇÃO (%)
1	30,0	24,9	5,10	17,0
2	30,0	24,8	5,20	17,3
3	30,0	24,6	5,40	18,0
4	30,0	24,7	5,30	17,7
5	30,0	24,9	5,10	17,0
6	30,0	25,0	5,00	16,7
7	30,0	24,7	5,30	17,7
8	30,0	24,8	5,20	17,3
9	30,0	24,8	5,20	17,3
10	30,0	24,9	5,10	17,0

Tabela 4.4 Resultados das medições nos diâmetros nas pastilhas sinterizadas à 1.000ºC (1º sinterização).

PASTILHA Nº	DIÂMETRO INICIAL (mm)	DIÂMETRO FINAL (mm)	VARIAÇÃO (mm)	RETRAÇÃO (%)
1	30,0	24,5	5,50	18,3
2	30,0	24,3	5,70	19,0
3	30,0	24,4	5,60	18,7
4	30,0	24,2	5,80	19,3
5	30,0	24,5	5,50	18,3
6	30,0	24,5	5,50	18,3
7	30,0	24,3	5,70	19,0
8	30,0	24,3	5,70	19,0
9	30,0	24,3	5,70	19,0
10	30,0	24,3	5,70	19,0

Tabela 4.5 Resultados das medições nos diâmetros nas pastilhas sinterizadas à 1.000ºC (2º sinterização).

PASTILHA Nº	DIÂMETRO INICIAL (mm)	DIÂMETRO FINAL (mm)	VARIAÇÃO (mm)	RETRAÇÃO (%)
1	30,0	27,3	2,70	9,00
2	30,0	27,1	2,90	9,67
3	30,0	27,0	3,00	10,00
4	30,0	27,0	3,00	10,00
5	30,0	27,1	2,90	9,67
6	30,0	27,5	2,50	8,33
7	30,0	27,4	2,60	8,67
8	30,0	27,4	2,60	8,67
9	30,0	27,2	2,80	9,33
10	30,0	27,2	2,80	9,33

Os resultados das médias dos valores de retração linear de queima, dos corpos de prova, nas temperaturas de 800º C, 900º C, 1.000º C (1º sinterização) e 1.000º C (2º sinterização) foram os seguintes: a 800º C (16,1%), a 900ºC (17,3%); a 1.000º C -1º sinterização- (18,8%): a 1.000º C -2º sinterização- (9,27%), como mostra a Figura 4.24.

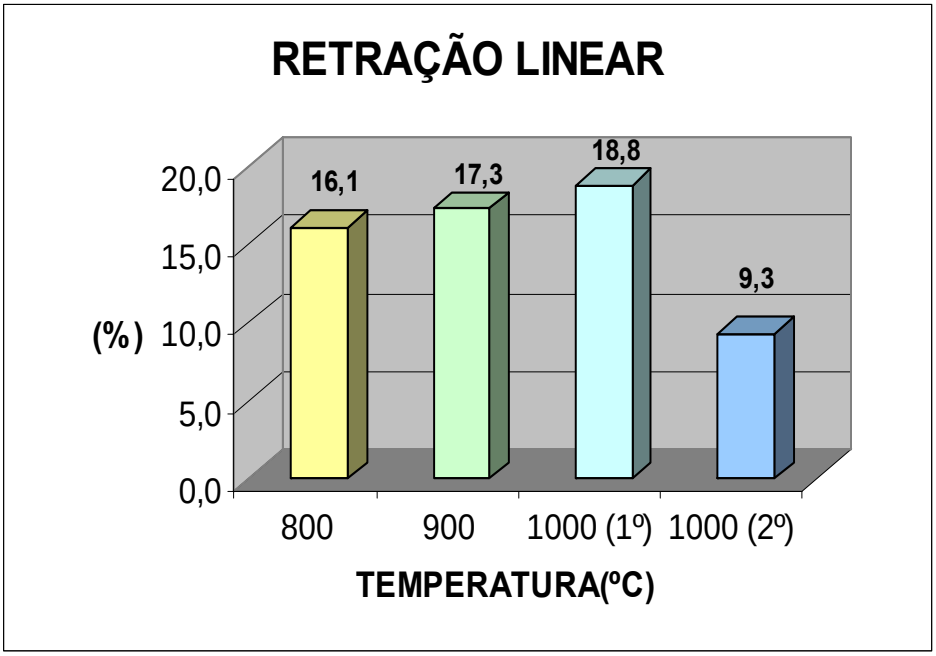

Figura 4. 24 Médias dos valores de Retração Linear dos corpos de prova.

A Figura 4.24 demonstra que o aumento da temperatura produz um pequeno aumento na retração linear dos corpos de prova, contudo a variação é percentualmente muito pequena e podemos considerar que Retração praticamente não varia com a faixa de temperatura utilizada (de 800 a 1.000º C). Estes corpos de prova apresentaram fissuras e trincas, fato esperado diante de uma variação (diminuição) nas suas dimensões, pois foram geradas forças internas que provocaram o rompimento da superfície das pastilhas. Nenhuma das amostras teve retração negativa (expansão), demonstrando a similaridade das propriedades mecânicas do resíduo em comparação com tijolos cerâmicos (BATISTA et al,2009).

Os corpos de prova submetidos à temperatura de 1.000ºC(2º sinterização) sofreram as menores variações nas dimensões, com um valor médio de Retração Linear de 9,3%, muito abaixo das outras médias. Este resultado pode ser explicado pela retirada da maioria dos compostos voláteis presentes no resíduo, eliminado desta forma os vapores da decomposição destes compostos, favorecendo aumento na densificação da massa cerâmica, causando uma resistência à retração do corpo na direção medida.

4.4.2 **Perda ao Fogo**

Neste ensaio poderemos avaliar o teor de compostos voláteis, formados na decomposição da matéria orgânica e saída do vapor de água , presentes no resíduo da ETA. O aspecto visual dos corpos de prova, mostrado na Figuras 4.16 a 4.23 apontam que as pastilhas perderam massa, pois apresentam várias imperfeições e fraturas em toda a superfície, em quase todas as amostras, exceto na 2º sinterização realizada na temperatura de 1000ºC.

As Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os valores das pesagens realizadas nos corpos de prova antes e depois das sinterizações:

Tabela 4.6 Resultados das pesagens nos corpos de prova sinterizados à 800ºC.

PASTILHA Nº	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	VARIAÇÃO (g)	PERDA AO FOGO (%)
1	12,9	8,1	4,8	37,2
2	8,3	5,3	3,0	36,1
3	7,9	4,8	3,1	39,2
4	7,8	4,9	2,9	37,2
5	8,0	4,9	3,1	38,8
6	7,8	4,9	2,9	37,2
7	7,9	4,8	3,1	39,2
8	7,4	4,6	2,8	37,8
9	7,9	4,8	3,1	39,2
10	8,0	5,0	3,0	37,5

Tabela 4.7 Resultados das pesagens nos corpos de prova sinterizados à 900ºC.

PASTILHA Nº	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	VARIAÇÃO (g)	PERDA AO FOGO (%)
1	7,0	3,1	3,9	55,7
2	7,6	4,4	3,2	42,1
3	8,0	4,8	3,2	40,0
4	7,9	4,7	3,2	40,5
5	7,3	4,4	2,9	39,7
6	7,6	4,6	3	39,5
7	7,8	4,7	3,1	39,7
8	7,5	4,3	3,2	42,7
9	8,0	4,9	3,1	38,8
10	7,6	4,6	3,0	39,5

Tabela 4.8 Resultados das pesagens nos corpos de prova sinterizados à 1.000ºC (1ºsinterização).

PASTILHA Nº	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	VARIAÇÃO (g)	PERDA AO FOGO (%)
1	7,7	4,8	2,9	37,7
2	7,6	4,5	3,1	40,8
3	7,5	4,3	3,2	42,7
4	8,0	4,6	3,4	42,5
5	8,0	4,5	3,5	43,8
6	8,0	4,7	3,3	41,3
7	7,9	4,8	3,1	39,2
8	7,7	4,6	3,1	40,3
9	7,9	4,6	3,3	41,8
10	7,8	4,6	3,2	41,0

Tabela 4.9 Resultados das pesagens nos corpos de prova sinterizados à 1.000ºC (2º sinterização).

PASTILHA Nº	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	VARIAÇÃO (g)	PERDA AO FOGO (%)
1	4,9	4,7	0,2	4,1
2	5,2	4,9	0,3	5,8
3	5,3	4,9	0,4	7,5
4	5,3	5,0	0,3	5,7
5	5,2	4,8	0,4	7,7
6	5,2	4,8	0,4	7,7
7	5,1	4,6	0,5	9,8
8	5,4	5,1	0,3	5,6
9	5,3	4,9	0,4	7,5
10	5,2	4,7	0,5	9,6

Os resultados das médias dos valores de percentual de Perda ao Fogo, dos corpos de prova, nas temperaturas de 800º C, 900º C, 1.000º C (1º sinterização) e 1.000º C (2º sinterização) foram os seguintes: a 800º C (38,0%), a 900ºC (41,8%); a 1.000º C -1º sinterização- (41,1%): a 1.000º C -2º sinterização- (7,10%), como mostra a Figura 4.25

.

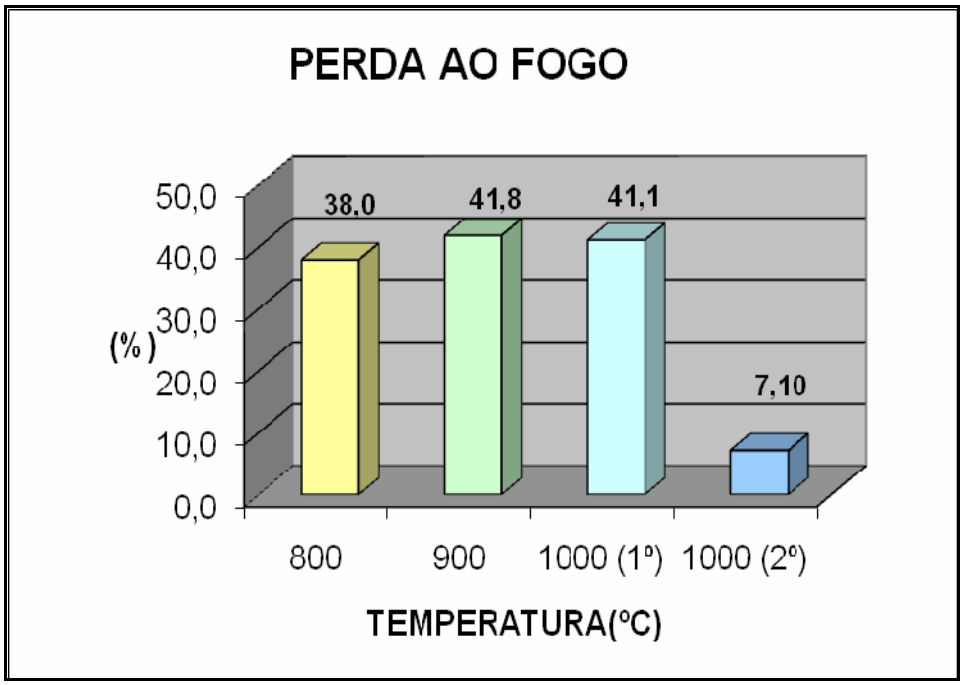

Figura 4. 25 Médias dos valores de Perda ao Fogo dos corpos de prova.

4.4.3 **Absorção de Água**

Utilizamos o procedimento analítico descrito na Norma NBR-15270-3, que especifica os métodos de ensaios em blocos cerâmicos estruturais e de vedação. De acordo com esta Norma o índice de absorção de água não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%, no entanto devemos levar em consideração estes índices apenas como referência de comparação, pois os corpos de prova feitos com o resíduo (lodo seco) não foram submetidos aos mesmos processos que os blocos de alvenaria passam nas olarias.

Foram utilizados 12 corpos de prova de acordo com a seguinte distribuição de origem de temperatura e moagem: na temperatura de 800ºC foram usadas 2 pastilhas (pastilhas P5 e P6 são da Moagem 2); na temperatura de 900ºC foram usadas 2 pastilhas (P7-Moagem 1 e P8- Moagem 2); na temperatura de 1.000ºC (1º sinterização) foram usadas 4 peças (P9, P10 e P11– Moagem 2 e P12-Moagem 1); na temperatura de 1.000ºC (2º sinterização) foram usadas 4 pastilhas (P1 e P2- Moagem 1 e P3 e P4- Moagem 2) .

Os resultados das pesagens, o percentual de absorção de água e a numeração das pastilhas são apresentados na Tabela 4.10:

Tabela 4.10 Resultados das pesagens no ensaio de Absorção de Água.

PASTILHA Nº	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	PESO DE ÁGUA(g)	ABSORÇÃO (%)
1	4,96	5,91	0,95	19,18
2	4,65	5,56	0,92	19,73
3	5,04	6,11	1,07	21,32
4	3,68	4,41	0,73	19,86
5	4,93	6,25	1,31	26,58
6	4,68	5,91	1,22	26,15
7	4,86	5,92	1,06	21,86
8	4,59	5,63	1,04	22,61
9	4,67	5,39	0,72	15,39
10	4,64	5,31	0,67	14,49
11	4,82	5,69	0,88	18,18
12	4,91	5,56	0,65	13,26

Os resultados das médias dos valores de absorção de água dos corpos de prova nas temperaturas de 800º C, 900º C, 1.000º C (1º sinterização) e 1.000º C (2º sinterização) foram os seguintes: a 800º C (20,0%), a 900ºC (26,4%); a 1.000º C -1º sinterização- (22,2%): a 1.000º C -2º sinterização- (15,3%), como mostra a Figura 4.26.

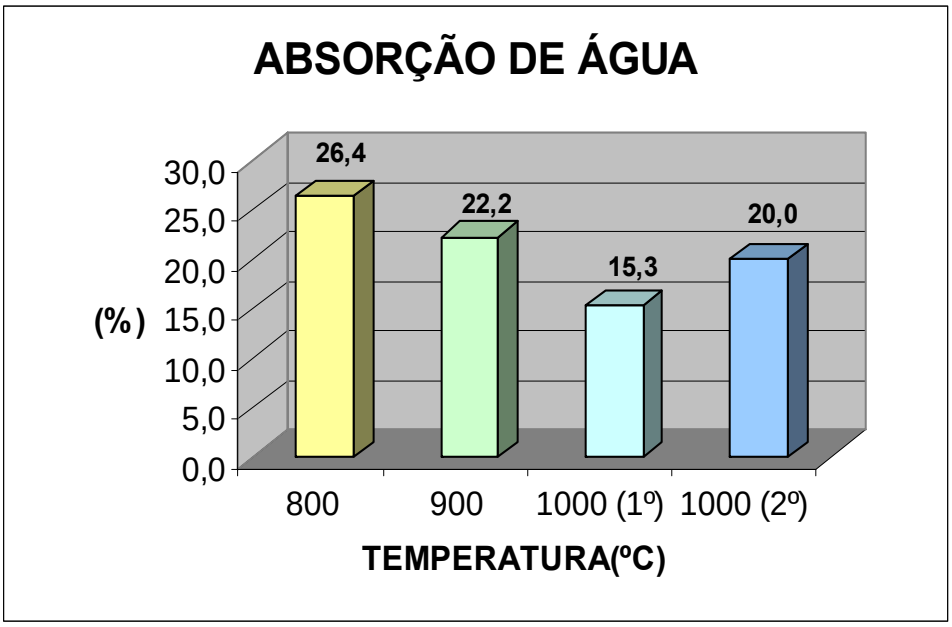

Figura 4. 26 Médias dos valores de Absorção de Água dos corpos de prova.

Pode-se verificar que a absorção de água tende a diminuir com o aumento da temperatura de queima, isto devido à densificação que ocorre no material (COLLATO, 2008).

Os corpos de prova das amostras submetidas a sinterizações nas menores temperaturas (800ºC e 900ºC) apresentaram maiores valores absorção de água, devido ao fato das temperaturas não proporcionarem sinterizações completas e eficientes, ocorrendo assim o aparecimento dos poros e o aumento da quantidade deles, favorecendo o surgimento de fissuras e o aumento na absorção de água. O fenômeno de vitrificação influenciou na menor absorção de água na amostra à 1.000ºC (1ªsinterização), pois diminui a área externa que absorve água, com isto, a absorção na amostra à 1.000ºC (2ªsinterização) aumentou, pois a área onde ocorreu vitrificação foi bem menor, favorecendo a absorção. Este mecanismo de aumento dos poros também tem efeito nas propriedades mecânicas do material, pois, segundo Callister (2008), à medida que se aumenta a porosidade de um material, diminui-se a resistência mecânica do mesmo e vice-versa, pois os poros agem como fases de resistência nula e concentradores de tensões agindo como defeitos para a iniciação da fratura.

4.4.4 Microdureza Vickers

Neste Ensaio foram realizadas 10 medidas de Indentação em cada corpo de prova (1 para cada temperatura) , por um microdurômetro Vickers com indentador em forma de pirâmide , nas amostras que foram sinterizadas nas temperaturas de 900°C, 1000°C(1º sinterização) e a 1000°C(2º sinterização). Em todas as indentações foi usada uma força de 2000G e tempo de 30s. Nas Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 são mostrados os resultados de microdureza (HV), a qual é uma função das diagonais da base da indentação.

Tabela 4.11Resultados da análise de microdureza nas amostras a 900ºC.

Indentação	Diagonal 1 (em micrômetros)	Diagonal 2 (em micrômetros)	HV
1	160,39	166,08	139,19
2	162,78	149,38	152,24
3	166,83	157,23	141,27
4	161,38	140,20	163,11
5	154,77	158,69	150,98
6	170,20	166,06	131,20
7	161,86	158,48	144,57
8	188,97	169,34	115,55
9	172,20	169,19	127,29
10	150,31	156,81	157,28

Tabela 4.12 Resultados das análises de microdureza nas amostras a 1.000ºC (1ª sinterização).

Indentação	Diagonal 1 (em micrômetros)	Diagonal 2 (em micrômetros)	HV
1	178,69	177,06	117,22
2	176,81	171,25	122,46
3	174,06	171,50	124,24
4	176,00	165,31	127,35
5	167,13	166,63	133,18
6	187,06	176,19	112,43
7	174,94	175,88	120,54
8	175,81	171,89	120,11
9	165,63	169,69	131,94
10	165,63	164,81	135,84

Tabela 4.13 Resultados das análises de microdureza nas amostras a 1.000ºC (2ª sinterização).

Indentação	Diagonal 1 (em micrômetros)	Diagonal 2 (em micrômetros)	HV
1	170,27	163,93	132,79
2	172,22	164,92	130,52
3	170,45	163,02	133,41
4	158,91	160,98	144,97
5	157,00	160,89	146,80
6	166,47	164,40	135,50
7	161,23	158,19	145,40
8	169,17	161,56	165,63
9	172,06	166,73	129,25
10	159,73	169,69	136,71

Não foi possível realizar o ensaio na amostra sinterizada a 800ºC porque a superfície do corpo de prova apresenta pouca dureza, de modo que a pirâmide do

indentador não marcava a superfície da pastilha. Os resultados das médias dos valores de microdureza dos corpos de prova nas temperaturas de 900º C, 1.000º C (1º sinterização) e 1.000º C (2º sinterização) foram os seguintes: a 800º C (%), a 900ºC (%); a 1.000º C -1º sinterização- (%): a 1.000º C -2º sinterização- (%), como mostra a figura 4.27.

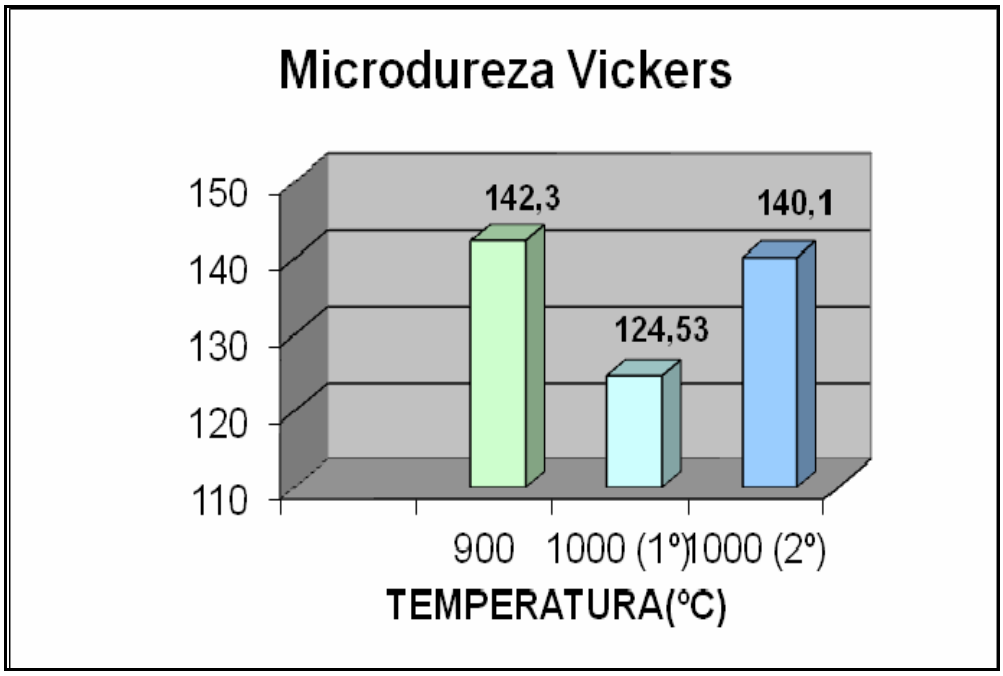

Figura 4.27 Médias dos valores de Microdureza Vickers dos corpos de prova.

4.4.5 Resistência à Compressão

Os ensaios de Resistência à Compressão foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica, utilizando |uma prensa hidráulica Instron Modelo 8801 Serial p7235, com capacidade máxima de 100 KN.

Durante a experiência foram feitos ensaios em 2 amostras sinterizadas a 800°C, 1 ensaio na amostra a 900°C e 1 ensaio em um corpo de prova retirado de tijolo cerâmico de 6 furos, em condições equivalentes (espessura semelhante) aos corpos de prova do resíduo para posterior comparação, todos realizados com uma velocidade do cabeçote de 2mm/min. Não foi possível realizar o ensaio nas outras amostras sinterizadas a 900ºC e 1.000ºC devido à quebra do suporte de amostra da prensa. Os resultados são apresentados na Figura 4.28:

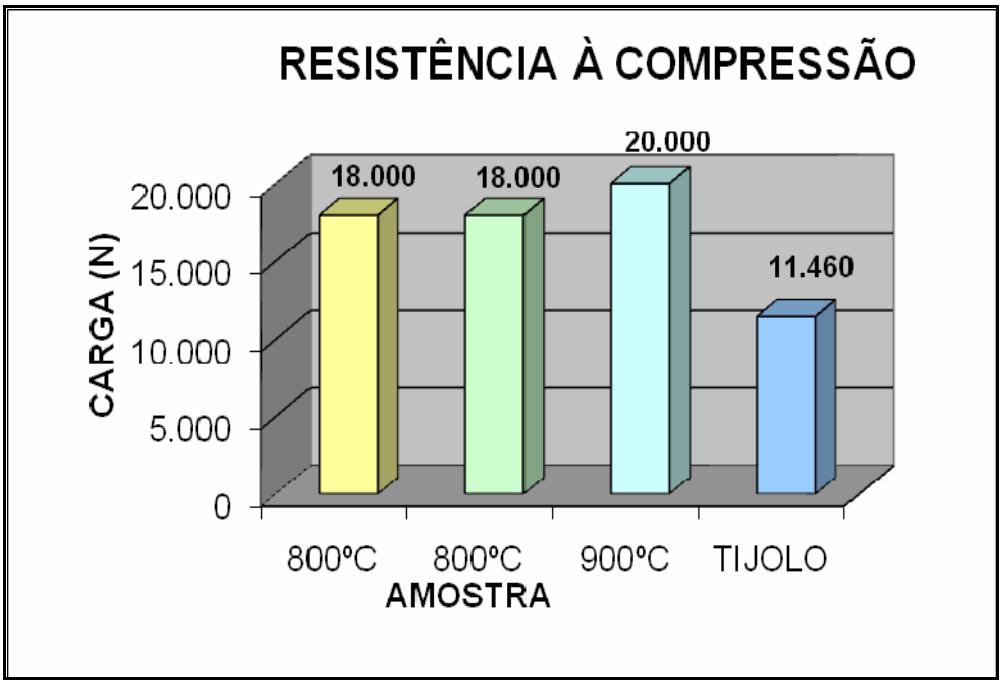

Figura 4.28 Valores de Resistência à Compressão dos corpos de prova.

5. CONCLUSÕES

Os resíduos gerados na Unidade Piloto de Tratamento dos Efluentes da Estação de Tratamento de Água de Botafogo, situada em Igarassu (PE), constituem-se de um material com enorme potencial para reaproveitamento na indústria de cerâmicas vermelhas, pois sua composição assemelha-se à de argilas naturais.

Este resíduo é constituído quimicamente, em sua maioria, pelos compostos Fe_2O_3, SiO_2 e Al_2O_3, e do ponto de vista mineralógico, é constituído de alumina, sílica e hematita. Os compostos de Ferro e Silício estão presentes na água bruta, vindos do solo, e os compostos de Alumínio são provenientes dos coagulantes (Al_2SO_3 e Policloreto de Alumínio) usados no tratamento e das argilas do solo (que contém alumino-silicatos).

Os resultados de absorção d'água dos corpos de prova apresentaram uma grande variação dependendo da temperatura de sinterização, sendo na temperatura de 1.000ºC os melhores valores, indicando que a porosidade do material diminui com o aumento de temperatura de processo.

Observando os resultados das Análises de Perda ao Fogo e ATG concluímos que existe uma grande quantidade de material volátil (água e matéria orgânica) no resíduo. A presença de fissuras e trincas nos corpos de prova indica a saída dos gases gerados na decomposição da matéria orgânica e saída da água quimicamente ligada ao material. Os resultados de Perda ao Fogo e Retração linear melhores para a amostra 1.000(2º sinterização) indicam que os gases influenciam negativamente na transferência de massa e formação dos poros na estrutura cristalina.

Os ensaios de Microdureza Vickers demonstram que esta propriedade é influenciada positivamente pelo aumento da temperatura de sinterização, devido à densificação do material, e negativamente pela presença de compostos orgânicos do resíduo.

Os resultados de resistência dos corpos de prova do resíduo são muito superiores aos da amostra de tijolo, praticamente o dobro dos valores, então podemos concluir que o resíduo otimizaria esta propriedade nos tijolos e também apresenta propriedades mecânicas aceitáveis para sua utilização em revestimento cerâmicos.

Os resultados demonstraram que os corpos cerâmicos produzidos com resíduo de ETA apresentam propriedades tecnológicas adequadas e que o lodo pode ser utilizado em cerâmicas vermelhas, dependendo apenas de um tratamento térmico adequado que elimine alguns compostos presentes.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Produção de corpos de prova com adição das matérias primas dos processos de produção de tijolos e revestimentos cerâmicos com diferentes proporções do resíduo e matérias-primas e estudar suas propriedades mecânicas para determinar as proporções ótimas dos constituintes das amostras.

Submeter as amostras de resíduos e os corpos de prova a ensaios científicos mais específicos como o MEV, para conhecimento estrutural e micro estrutural das amostras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS

ABC, Associação Brasileira de Cerâmica, 2010. Informações Técnicas: Definição e Classificação. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/abc_0.asp >.
Acesso em 24dez. 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos Sólidos-Classificação: NBR 10004, Rio de Janeiro,2004.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público: NBR 12216, Rio de Janeiro,1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação- Métodos de Ensaio: NBR 15270 -3, Rio de Janeiro, 2005.

ALBUQUERQUE, L ENITA MOURA DA COSTA. **Reciclagem e Estudo de Reaproveitamento de Resíduos Cerâmicos de Indústria de Louça Sanitárias**, UFPE, 2009, p.29,38. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

ANA, Agencia Nacional de Águas. Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil. Caderno de Recursos Hídricos,2.Brasília.2007.123p.

ARBOLEDA, J.V. **Teoria y prática de La purificacion Del água**-Tomo 2. Colombia:McGraw-Hill.2000.642p

AWWA, AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION. **Water Quality and Treatment-A Handbook of Community Water Supplies.**5th.USA.McGraw Hill.1999. 1248p

AWWA,AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION. **Calidad y Tratamento del Àgua. Manual de Suministros de Água Comunitária.** 5 th . McGraw Hill.2002.1231p

BATISTA,VR.; NASCIMENTO, J.J.S.; LIMA, A.G.B. **Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maçicos e vazados: uma investigação teórica e experimental**. Revista Matéria, v 14, n 4, p 1188-1100, 2009. Disponível em http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11055
Acesso em: 15 de dez. de 2010.

CALLISTER JR, William. D..**Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução. 7**.ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008. p. 266, 281, 346, 563.

CBL **Eletrodos e Soldas Ltda**. Disponível em: <http://www.cblsoldas.com.br> Acesso em 20 dez. 2010

CHEREMISINOFF, P. N.. **Process Engineering Handbook Series:Solids/Liquids Separation**.EUA.1995.

COLLATTO, DÉCIO; BERGMANN, CARLOS PÉREZ; RAMIRES, MARCUS VINÍCIUS VELEDA. **Influência da granulometria do resíduo de celulose nas propriedades do material cerâmico**. Estudos tecnológicos - Vol. 4, nº1:01-11,jan/abr 2008. Disponível em: <http://www.estudostecnologicos.unisinos.br/pdfs/80.pdf>.
Acesso em: 28 jan 2011

COMPESA. **Relatório Técnico da Estação de Tratamento de Água de Botafogo**. Coordenação de Tratamento de Água/Gerência de Controle de Qualidade. Recife, 2010. 6p

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**, 2edição.São Carlos: Ed RiMa.2005.1565p.

DI BERNARDO, LUIZ; SABOGAL PAZ, LYDA PATRICIA. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água.** .São Carlos, Ed. LDIBE LTDA, Vol 1, 2008. p. 1, 5,116.

DI BERNARDO, LUIZ; SABOGAL PAZ, LYDA PATRICIA. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água.** .São Carlos, Ed. LDIBE LTDA, Vol 2, 2008. p.942, 950, 1015-1041, 1066.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. São Paulo, Editora Art Liber, 3ed.2000. 248p

GALVIS,G;LATORRE,J.L.;FERNANDES,J;VISSCHER,J.T.**MultistageFiltration. AWater Treatment Technology**. IRC.CINARA. Universidade del Valle. The Hague. The Netherlands.1998

GRANDIN, S.R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JR.,A.D. **Desidratação de Lodos Produzidos em Estações de tratamento de água**. In:Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental,17.,1993,Natal.Anais...ABES,1993.Vol.2,p.324-341.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <http://www.google.com.earth> Acesso em 15 fev. 2011.

HAMANN, CL.; MCKINNEY, R. E.**Up flow Filtration Process** .JAWWA v. 60, n 9, p1023-1039,1968.

HERMER, R.; HESPANHOL, I. **Water pollution control: A guide to the use of water quality management principles**. London: UNESCO, WHO, UNEP, 1997. 526 p.

KINGSLAKE , RUDOLF. **Applied Optics and Optical Engineering**., Volume IV, Parte I, 1967,p31. Disponível em: < www.cfdiif.unicamp.br>. Acesso em 05 fev. 2011.

Laboratório de Caracterização por Raios X, UNICAMP**. Equipamentos do Laboratório de Fusão por Feixe de Elétrons e Tratamentos Termomecânicos**. Disponível em <http://lffe.dema.fem.unicamp.googlepages.com/infraestrutura> Acesso em 16 jan 2011.

LEMES,F.P.**Teoria e Técnicas de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: ABES.1990.610p

LORETZ, JULIANA; BARROS, MENDES. **Revistas das Águas. A água e sua Distribuição Espacial**. Revistas das Águas , 4ªCDD, Ano 2, Número 6,junho.2008. Disponível em: <http:// revistadasaguas.pgr.mpf.gov.br/edicoes-da-revista/revista5/ >. Acesso em 15dez. 2010.

LUXOR **Tecnologia em Máquinas Ltda**. Disponível em: <http://www.luxor.ind.br> Acesso em 07 fev. 2011.

Ministério do Meio Ambiente-MMA; Agência Nacional de Águas –ANA(2007) GEO-Brasil: **Recursos Hídricos: Componente da Série de relatórios sobre o Estado e Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil.** Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional de Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.Brasília.p246

MOTTA, Jose Francisco; ZANARDO, Antenor. **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das principais Industrias e seus produtos** , Parte II, Cerâmica Industrial, Vol. 6 (2), p. 28-39, 2001. Disponível em < http://www.ceramicaindustrial.org.br/>. Acesso em 04 de fev.2011.

OLIVEIRA, E.M.S.; Machado, S. Q.; Holanda, J. N. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha,**2004**.** Revista brasileira de Cerâmica, 2004, n 50,p.324-336. Disponível em: < www.scielo.br/pdf/ce/v50n316/a0750316.pdf >.
Acesso em 15 ago. 2010.

PORTELLA,K.F.;ANDREOLI,C.V;HOPPEN,C.;SALES,A.BARON,O.
Caracterização fisico-química do lodo centrifugado da estação da estação de tratamento de água Passaúna-Curitiba-Pr. In:22ºCongresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. Joenvile, 2003. Disponível em: **<**www.sanepar.com.br/.../**Lodo**.../**Caracterizacao**_do_**lodo**_de_ETA.pdf >
Acesso em: 22 de jun. de 2010

PROSAB, PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BASICO . **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta.** Rio de Janeiro. ABES. 2003. 480p.

REALI, M.A.P.; MORUZZI,R.B.;PATRIZZI,L.J. **Flotação por ar dissolvido aplicada na clarificação de águas que apresentam pico de turbidez**.In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL..Joinville, 2003,8p

RIBEIRO, FREDERICO LUIZ DE MATOS, **Quantificação e caracterização Química dos Resíduos da ETA Itabirito,** 2007, p. 15 Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto-MG

RICHER, C.A.;AZEVEDO NETO,J.M.**Tratamento de Água**.São Paulo:Editora Edgar Blucher,1991.332p

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. 1º.ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2001.112p.

SABOGAL PAZ, L.P. **Modelo conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para comunidades de pequeno porte.** Tese (doutorado) Escola de Engenharia de S. Carlos. Universidade de S. Paulo, 2007, 509p.

SOLANO, F.C.A.; S ABOGAL,L.P.; GALVIS, C. A.; LATORRE, M.J. **El Riesgo Sanitario y la Eficiencia de lãs Tecnologías em la Selección Tecnología para Potabilización del Agua.** In: Seminario Taller Selección de Tecnologia para el Mejoramiento de la Calidad de Agua. Santiago de Cali, Colombia.2000.20p.

SANTOS, PÉRSIO SOUZA. **Tecnologia de Argilas**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda & Editora da Universidade de São Paulo, vol. 1, 1975, 340p.

.

SHIMADZU do Brasil. Produtos: Instrumentos para Laboratório. Disponível em < http:// www.shimadzu.com.br >
Acesso em 10 out. 2010.

TSUTUYA, M.T.; HIRATA, A.Y.**Aproveitamento e Disposição Final de lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo**. In:Congresso Brasileiro de

Engenharia Sanitária e Ambiental, 21.,2001,João Pessoa.Anais...João Pessoa: ABES,2001.1CD-ROM,p.21.

YADAVA, Y. P.; SALES D. G.; GODOI G. S.; SOUZA, DULCINA F. DE. **Análise da Composição e Modificações Ocorridas em Prótese Dentárias Sinterizadas com Aditivo Industrial.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais-Cbecimat, 2008, Porto de Galinhas. Anais de Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais-Cbecimat. São Paulo : Metallum, 2008. Vol. 1. p. 83.