



ESTUDO ANALÍTICO DA ADIÇÃO DE LODO DE ETA E MICROESFERAS DE VIDRO EM CERÂMICA

Bruno Emanuel Del Boca Sogdu Martins

Projeto Final de Curso

Orientadores

Profa. Valéria Castro de Almeida, D. Sc.
Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc.

Dezembro de 2011

**ESTUDO ANALÍTICO DA ADIÇÃO DE LODO DE ETA E
MICROESFERAS DE VIDRO EM CERÂMICA**

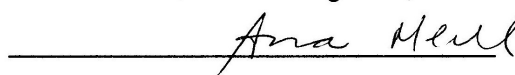
Bruno Emanuel Del Boca Sogdu Martins

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:



Ana Catarina Evangelista, D. Sc.

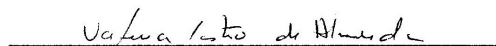


Ana Mehl, D. Sc.



Denize Dias de Carvalho, D. Sc.

Orientado por:



Valéria Castro de Almeida, D.Sc.



Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro de 2011

Martins, Bruno Emanuel Del Boca Sogdu.

ESTUDO ANALÍTICO DA ADIÇÃO DE LODO DE ETA E MICROESFERAS DE VIDRO EM CERÂMICA / Bruno Emanuel Del Boca Sogdu Martins. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011.

xi, 58 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

Orientadores: Valéria Castro de Almeida e Claudinei de Souza Guimarães.

1. Lodo de ETA. 2. Microesferas de vidro. 3. Material Cerâmico. 4. Monografia. (Graduação - UFRJ/EQ). 5. Valéria Castro de Almeida e Claudinei de Souza Guimarães. I. Título.

Para meu avô Benito,
a melhor lembrança que tenho comigo.

“A dúvida é o princípio da sabedoria”.

Aristóteles

Agradecimentos

À minha orientadora Valéria, por despertar em mim o interesse pela área de Processos Inorgânicos, pela infinita paciência e por estar sempre disposta a me prestar o auxílio necessário;

Ao meu orientador Claudinei, pela forma com que enriqueceu meu conhecimento e colaborou com o projeto;

Aos meus pais, Paulo e Sandra, por serem as figuras de maior relevância em minha vida, por estarem sempre prontos a mover terra e céu por mim, por não medirem esforços em garantir as melhores oportunidades de estudo e por serem as pessoas que mais amo;

Aos meus avós, Benito e Luzia, pelo carinho devotado e pelas eternas lembranças que me ajudam a sorrir; Fernando, pela pré-disposição genética pela engenharia e Ângela, pela ajuda incondicional;

À Vanessa, pelo ininterrupto apoio e ajuda técnica em todos os momentos desde o início do trabalho;

À empresa Águas de Niterói, por disponibilizar o lodo;

Ao professor Jo Dweck, pelos esclarecimentos prestados;

À professora Mariana de Mattos Vieira Mello Souza, por disponibilizar o aparelho de Raios X e também pela realização das análises térmicas;

À técnica Ana Paula Duarte, pelas análises de infravermelho no Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais;

Aos amigos Diogo, Rod, Bia e Hellen, por serem as pessoas que a faculdade presenteou para a vida;

Aos meus tios e primos, pelo reconfortante amparo familiar;

Ao Corpo do DPI, em particular às professoras Lídia, Leila e aos técnicos Alice, Aline, Hélio e Maria Júlia, pelo bom-humor, simpatia e nível técnico com quem marco as aulas e ao Alexandre, pela distinta presteza;

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

ESTUDO ANALÍTICO DA ADIÇÃO DE LODO DE ETA E MICROESFERAS DE VIDRO EM CERÂMICA

Bruno Emanuel Del Boca Sogdu Martins

Dezembro, 2011

Orientadores: Profa. Valéria Castro de Almeida, D. Sc.
Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc.

Uma crescente preocupação com o meio ambiente tem levado as estações de tratamento de água (ETA) a pensar em alternativas para a destinação do lodo gerado no referido tratamento. A questão da preservação não admite o uso de métodos inadequados e insustentáveis de disposição, levando à procura por alternativas que com mínimo dano ao meio ambiente.

É necessário conhecer a operação das ETAs, visando à minimização ou redução dos impactos ambientais causados pelo lançamento desses rejeitos através do seu reaproveitamento em outras atividades. Esse trabalho tem como principal objetivo mostrar uma proposta de aproveitamento de lodos gerados em ETA, enfocando sua incorporação na fabricação de materiais cerâmicos.

A utilização do lodo de ETA na fabricação de materiais cerâmicos mostrou-se possível desde que o teor máximo de lodo incorporado não ultrapasse 10%. Acima dessa concentração observou-se um sério comprometimento nas propriedades físicas e mecânicas do material. A fim de minimizar o impacto na qualidade do material, foram adicionadas microesferas de vidro que ocasionou a melhora esperada nas propriedades das peças estudadas.

Esse estudo indica uma forma viável de reaproveitar materiais rejeitados, minimizando custos com matéria-prima e com o cuidado necessário quando da disposição final desse material. Além da vantagem econômica, existe o benefício no que toca o meio ambiente, que sofreria menor impacto no caso de essas práticas serem adotadas.

ÍNDICE

I - INTRODUÇÃO	1
I.1 - OBJETIVOS	3
I.1.1 - Objetivo Geral	3
I.1.2 - Objetivos Específicos	3
I.2 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	4
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
II.1 Origem dos lodos de ETAs: coagulação da água bruta	5
II.2 - Classificação Ambiental do lodo de ETA	7
II.3 - Características físico-químicas do lodo de ETA	8
II.4 - Impactos ambientais e toxicidade de lodo de ETAs	9
II.5 - Destinação final de lodo da ETA	10
II.6 - As microesferas de vidro proveniente da câmara de jateamento	13
II.7 - A indústria cerâmica vermelha	15
II.8 - Incorporação de outros resíduos à cerâmica vermelha	17
III - MATERIAIS E MÉTODOS	19
III.1 - MATERIAIS UTILIZADOS	19
III.2 - TRATAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	19
III.2.1 - Análise granulométrica das matérias-primas	20
III.3 - CARACTERIZAÇÃO ELEMENTAR DAS MATÉRIAS-PRIMAS	20
III.3.1 - Determinação do teor de umidade	20
III.3.2 - Caracterização mineralógica	21
III.3.2.1 - Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)	21
III.3.2.2 - Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) ..	21
III.3.2.3 - Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	22
III.3.2.4 - Difração de Raios X (DRX)	23
III.3.2.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	23
III.4 - CONFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIO DE QUEIMA	23
III.5 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA	26
III.5.1 - Avaliação da Retração Linear (RL)	26
III.5.2 - Ensaio de Absorção de Água (AA)	27

III.5.3 - Ensaio de Porosidade Aparente (PA)	27
III.5.4 - Densidade (D)	28
III.5.5 - Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão (TRF)	29
IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
IV.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS	30
IV.1.1 - Análise granulométrica	30
IV.1.2 - Caracterização elementar	31
IV.1.2.1 - Determinação do teor de umidade.....	31
IV.1.2.2 - Caracterização mineralógica	31
IV.1.2.2.1 - Análise por Fluorescência de Raios X.....	31
IV.1.2.2.2 - Análise por Difração de Raios X.....	33
IV.1.2.2.3 - Análise por Espectrometria de Infravermelho	34
IV.1.2.2.4 - Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura.....	36
IV.1.2.2.5 - Análise térmica.....	38
IV.2 - AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA APÓS A QUEIMA	40
IV.3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA CERÂMICOS	40
IV.4 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS MASSAS CERÂMICAS APÓS A QUEIMA	45
IV.4.1 - Análise por difração de Raios X	45
IV.4.2 - Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	48
V - CONCLUSÃO	51
VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura II.1	Pontos de geração de Resíduos de uma ETA tradicional	6
-------------	--	---

CAPÍTULO III

Figura III.1	(a) argila triturada, (b) lodo in natura da ETA e (c) microesferas de vidro	19
Figura III.2	Diagrama das etapas concretizadas até a realização dos ensaios tecnológicos	24
Figura III.3	Matriz retangular de aço inox utilizada na compactação dos corpos de prova	25
Figura III.4	Pontos estabelecidos para a determinação das medidas	25

CAPÍTULO IV

Figura IV.1	Difratograma da Argila	33
Figura IV.2	Difratograma do Lodo de ETA	33
Figura IV.3	Difratograma das Microesferas de vidro	34
Figura IV.4	Análise por Espectrometria de Infravermelho da argila	35
Figura IV.5	Análise por Espectrometria de Infravermelho do lodo “ <i>in natura</i> ”	35
Figura IV.6	Análise por Espectrometria de Infravermelho das microesferas de vidro	36
Figura IV.7	Fotomicrografia da Argila e análise por EDS	36
Figura IV.8	Fotomicrografia do lodo e análise por EDS	37
Figura IV.9	Fotomicrografia da microesfera de vidro e análise por EDS	37
Figura IV.10	Análise termogravimétrica da argila “ <i>in natura</i> ”	38
Figura IV.11	Análise termogravimétrica do Lodo de ETA	39
Figura IV.12	Análise termogravimétrica das microesferas de vidro	39
Figura IV.13	Retração Linear e Absorção de Água	41
Figura IV.14	Porosidade Aparente (A) e Densidade (B)	44
Figura IV.15	Tensão de Ruptura à Flexão	44
Figura IV.16	Difratograma da argila pura (AP) e da composição (L10) em diferentes temperaturas de queima	45
Figura IV.17	Difratograma da composição (M5L5) e da composição (M10L10) em diferentes temperaturas de queima	47
Figura IV.18	Fotomicrografia do CP preparado com argila pura calcinada a 1100°C	48
Figura IV.19	Fotomicrografia da composição L10 calcinada a 1100°C e análise por EDS	49
Figura IV.20	Fotomicrografia da composição M5L5 e análise por EDS	49

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela II.1	Teor de Umidade e pH das amostras de lodo de ETA	8
Tabela II.2	Análise química por Fluorescência de Raios X e Espectrofotometria de Absorção Atômica	8

CAPÍTULO V

Tabela V.1	Distribuição granulométrica da argila, do lodo de ETA e das microesferas de vidro	30
Tabela V.2	Teor de Umidade das matérias-primas	31
Tabela V.3	Composição química elementar (FRX)	32
Tabela V.4	Classificação de tijolos maciços ABNT – NBR 7170	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de Água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPC	Associação Brasileira de Cimento Portland
AFEE	Association Francaise Pour L'etude Des Eaux
ANFACER	Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
AP	Argila Pura
AWWA	Amercan Water Work Association
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DRX	Difração de Raios X
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DTA	Differential Thermal Analysis
EDS	Energy Dispersive X Ray Spectrometer
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FRX	Fluorescência de Raios X
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PA	Porosidade Aparente
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
RL	Retração Linear
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SEMAE	Serviço de Água e Esgoto de São Leopoldo
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
TRF	Tensão de Ruptura à Flexão
WCR	Water Research Center

I - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas verificou-se uma diminuição acentuada das reservas naturais, sejam essas minerais ou energéticas, em decorrência do crescimento do consumo e, conseqüentemente, do aumento da produção industrial. De igual maneira, acarretou a geração de uma grande quantidade e variedade de resíduos e subprodutos.

Outra consequência desse constante desenvolvimento é o aumento da geração de resíduos que cada vez mais necessitam serem dispostos de maneira adequada, reciclados ou reaproveitados. Entretanto, o que mais se observa é que falta infraestrutura e tecnologia necessárias para oferecer um destino adequado e esses resíduos acabam por serem tratados por meio de soluções improvisadas, como aterros e vazadouros, que geram uma série de transtornos.

A história industrial brasileira não difere do panorama global, visto que nunca dispôs corretamente os resíduos gerados, sendo estes, usualmente, despejados em rios, no mar, em terrenos baldios, enterrados ou simplesmente abandonados em galpões da própria empresa geradora. A poluição advinda dessas práticas tem, continuamente, seus efeitos nocivos observados não apenas no meio ambiente, mas também na saúde do próprio homem.

Com as novas normas e diretrizes para o gerenciamento de resíduos sólidos, a intensificação da legislação e a fiscalização muito mais presente e efetiva, torna-se inadmissível o descarte e disposição direta desses materiais no meio ambiente.

Em vista disso, as buscas por alternativas ambientalmente menos agressivas, mais eficazes e tratamentos eco-eficientes dos resíduos sólidos tem sido o caminho trilhado para reverter ou, pelo menos, amenizar o cenário negativo estabelecido pela disposição incorreta destes materiais.

O conceito de Desenvolvimento Sustentável implica em um “desenvolvimento que satisfaça as necessidades do presente sem comprometer as habilidades das gerações futuras para satisfazer suas próprias necessidades” (WCED, 1987). A Terra entrou num período de mudanças hidrográficas, climáticas

e biológicas que diferem dos episódios anteriores de mudança global, uma vez que é uma série de mudanças antropogênicas (Stern *et al.*, 1993). Segundo Spangenberg e Bonniot (1998), a degradação ambiental pode ser vista através de crescimento populacional, crescimento econômico, mudança tecnológica, instituições político-econômicas, atitudes e convicções.

Segundo a ONU, até 2027 aproximadamente 5% da população mundial habitará as grandes cidades. É, então, essa demanda por produtos e serviços voltados a quem vive nas cidades que resulta na devastação do meio ambiente, na poluição em todos os níveis e na escassez de recursos naturais. (www.idhea.com.br)

A água é de fundamental importância para a vida de todas as espécies, configurando-se insubstituível em diversas atividades humanas, além de manter o equilíbrio do meio ambiente. O Brasil é um país com dimensões continentais e uma população atual de aproximadamente cento e noventa bilhões de habitantes, possuindo uma boa disponibilidade hídrica, o que leva a um consumo crescente de água tratada e à construção de estações de tratamento de água (ETA) nas cidades do país.

O tratamento da água bruta, que pode ser captada de mananciais superficiais e subterrâneos, consiste em etapas que incluem processos físicos e químicos. No final do tratamento, a água deve estar de acordo com padrão potabilidade conforme a Organização Mundial de Saúde, que reúne as condições necessárias em termos de propriedades físicas, químicas e biológicas (OLIVEIRA, 2008).

Atualmente, poucos são os investimentos voltados para as estações de tratamento de água visando uma destinação final ambientalmente correta para o lodo oriundo dos decantadores e filtros-prensa das estações. Em contrapartida, muitas pesquisas estão sendo realizadas em torno desta problemática, tendo em vista o reaproveitamento do resíduo gerado nas estações de tratamento de água.

Segundo CORDEIRO (2001), existem no Brasil cerca de 7500 estações de tratamento de água convencionais ou tradicionais que empregam processos de coagulação/floculação/sedimentação e filtração. Esses sistemas geram rejeitos nos decantadores e nos filtros e os lançam diretamente em cursos d'água, agravando a questão ambiental.

O desaguamento do lodo em cursos d'água próximo às estações de tratamento é uma prática comum na maioria das ETAs, o que contraria a legislação vigente. Esse descarte provoca impactos ambientais importantes no corpo hídrico receptor como mudança de cor, aumento das concentrações de alumínio (proveniente dos sais utilizados no processo de coagulação), aumento na quantidade de sólidos em suspensão e de assoreamentos indesejáveis.

A transformação de um simples consumidor em um cidadão sustentável consiste em compreender que as ações pessoais repercutem e interferem na qualidade de vida de outras pessoas, na comunidade e no meio ambiente. Ter consciência de que, através de sua condição de consumidor, é capaz de influenciar no rumo da economia, buscando opções mais sustentáveis.

Assim, é fundamental uma mudança na cultura e atitudes dos indivíduos, de forma a tentar reverter ou, ao menos, deter este processo, assumindo responsabilidades diante de si e do planeta. Esta nova postura é chamada de cidadania sustentável.

A reciclagem e o reaproveitamento de resíduos sólidos são de fundamental importância para o controle e minimização dos impactos ambientais.

I.1 - OBJETIVOS

I.1.1 - Objetivo Geral

Desenvolver novos materiais cerâmicos e tecnologias de fabricação a partir de resíduos industriais como alternativa de disposição final adequada para o lodo gerado nas estações de tratamento de água e para as microesferas de vidro, resíduo de câmaras de jateamento.

I.1.2 - Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar as propriedades físico-químicas do lodo coletado na estação de tratamento de água em estudo;
- Avaliar através de ensaios físico-mecânicos e químicos as propriedades dos corpos cerâmicos obtidos com a adição do lodo de ETA e microesferas de vidro; e
- Caracterizar a formação de novas estruturas minerais obtidas após a sinterização.

I.2- APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Para a melhor compreensão do presente trabalho, neste tópico os capítulos são brevemente descritos para que o leitor entenda a estrutura da monografia.

A Revisão da Literatura fornece uma descrição sobre a origem e composição química do Lodo das Estações de Tratamento de Água, assim como alternativas de disposição final encontradas na bibliografia, como forma de minimizar o impacto ambiental ocasionado pela destinação incorreta destes resíduos.

No capítulo de Materiais e Métodos está descrita toda a metodologia experimental adotada durante a pesquisa, bem como as técnicas, os materiais e os equipamentos utilizados durante a execução do trabalho.

No capítulo Resultados e Discussões são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos por meio das técnicas descritas no capítulo anterior.

Finalizando, as Conclusões obtidas no decorrer da pesquisa.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 Origem dos lodos de ETAs: coagulação da água bruta

As etapas principais em uma ETA para o tratamento da água bruta são: aeração, eliminação de impurezas grosseiras, pré-cloração, controle de vazão, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação. (TEIXEIRA, 2006)

Todo este tratamento gera um inconveniente que é a produção de enormes quantidades de resíduos sólidos (lodos) que devem ser tratados e dispostos corretamente segundo norma brasileira correspondente, tal como nos Estados Unidos e em outras comunidades mundiais.

Nas ETAs, a água passa por várias etapas de tratamento e, após a adição de produtos químicos para coagulação/floculação, segue para a etapa de clarificação. Nesta fase, a água bruta sofre processos físico-químicos a fim de eliminar as partículas causadoras de turbidez. Ao final deste processo, tem-se água clarificada e acúmulo de resíduo sólido que fica retido no fundo dos decantadores, denominado de "lodo de ETA".

Na água bruta, além de partículas sedimentáveis, existem impurezas que se apresentam como partículas sólidas que se mantêm em suspensão devido a sua carga eletrostática, seu pequeno tamanho e seu peso reduzido. Estas partículas, ditas colóides, apresentam diâmetro entre 10^{-3} e 1 micra. O procedimento mais comum para eliminar estes sólidos consiste em desestabilizá-los e uni-los, formando flocos, que sedimentam com facilidade (FERRANTI, 2005).

A coagulação é um processo que consiste na adição de produtos químicos a uma dispersão coloidal a fim de neutralizar as cargas elétricas das partículas, desestabilizando-as através da redução das forças que as mantêm separadas e da absorção de cargas superficiais presentes. Trata-se de um processo largamente utilizado para promover a clarificação da água que contém partículas coloidais e sólidos em suspensão (ECKENFELDER, 1989).

Os mecanismos de coagulação da água são muito complexos e envolvem propriedades de superfície, potenciais elétricos, interações solvente-soluto,

solvente-partículas, produtos de solubilidade, condições de mistura e de pH, entre outros (FERRANTI, 2005).

No tratamento de água após o processo de clarificação, o resíduo formado que fica retido nos decantadores é composto por hidróxidos de alumínio, argilas, siltes, areia fina, material húmico e microrganismos. É uma substância não-newtoniana, extremamente gelatinosa e resistente ao adensamento, principalmente quando a água bruta possui baixa turbidez (FERRANTI, 2005).

Para Cordeiro (1999), nos decantadores é realizada a remoção da maior parte dos flocos e a água com partes destes flocos que não sedimentaram são encaminhados para os filtros, onde ocorre a clarificação final. Portanto, os principais resíduos gerados em uma ETA são oriundos da água de lavagem dos filtros, do lodo dos decantadores e dos rejeitos de limpeza dos tanques de equalização.

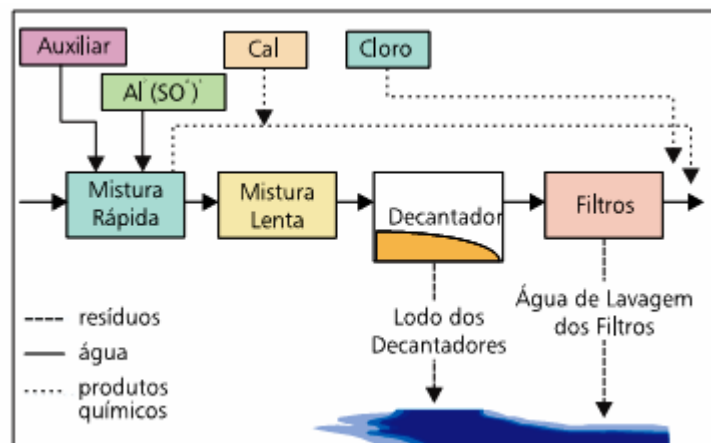


Figura II.1 - Pontos de geração de resíduos de uma ETA tradicional
Fonte: Prosab – Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água

Para Tavares et al.(2009), além do lodo gerado pela adição dos coagulantes com ferro e alumínio, um outro tipo de lodo formado é aquele que resulta da adição de cal e hidróxido de sódio, ou soda, utilizados para remover cálcio e magnésio de águas duras. Portanto, os resíduos gerados em uma ETA podem estar associados aos grupos que seguem:

- Matéria particulada e coloidal como argila, silte e material inerte oriundo do tratamento químico, como por exemplo, detritos de cal;
- Substâncias solúveis, como ferro, manganês, cálcio e magnésio, que são levados à forma de precipitado insolúvel por oxidação ou ajuste de pH;
- Precipitados formados pela aplicação de produtos químicos, tais como hidróxidos complexos de alumínio e ferro ($\text{Al}(\text{OH})_3$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3$); e
- Materiais utilizados nas unidades de tratamento, os quais periodicamente devem ser substituídos quando acaba sua vida útil, como carvão ativado em pó ou granulado, meio filtrante, etc.

Para Cordeiro (1999) e Andreoli (2001), os principais coagulantes utilizados são os sais metálicos, a cal e os polímeros orgânicos (polieletrólitos). Na maioria das ETAs, os coagulantes mais comuns são sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ou cloreto férrico (FeCl_3). A aplicação do processo convencional resulta na produção de lodo dos decantadores e águas de lavagem dos filtros com a presença de carvão ativado em pó, cal e polímeros. Estes autores afirmam que o lodo possui características quantitativas e qualitativas que variam em função da qualidade da água bruta, dos produtos químicos utilizados no tratamento, das condições de operação de cada unidade e do tempo de residência do lodo nos decantadores.

De uma forma geral, as estações de tratamento de água possuem operações similares, onde as etapas de tratamento geram resíduos com características distintas. Esse fato se relaciona ao tipo de produto químico utilizado, ao “layout” da estação e o tipo de operação (REALI, 1999).

II.2 - Classificação Ambiental do lodo de ETA

De acordo com a NBR-10.004 (2004), os lodos provenientes das estações de tratamento de água são classificados como “resíduos sólidos”.

Alguns ensaios foram realizados segundo esta norma e concluiu-se que o lodo de ETA é um resíduo sólido – Classe II A – não inerte e, portanto, devem ser tratados e dispostos dentro dos critérios estabelecidos por esta norma (ABOY, 1999 apud FERRANTI, 2005).

II.3 - Características físico-químicas do lodo de ETA

As características do lodo gerado nas estações de tratamento de água tem associação direta com as características da água bruta que chega na ETA. Estudos demonstram que lodos com alto teor de matéria orgânica apresentam as piores condições de adensamento e de desaguamento, se comparados com lodos que preferencialmente apresentam materiais sólidos inorgânicos como silte, argilas e hidróxido metálico precipitado (DULIN, B. E. et al., 1989 apud SABOGAL E DI BERNARDO, 2005).

Com o objetivo de realizar a caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna/Curitiba, Portella et al. (2003) analisaram as propriedades do lodo nos meses de julho e agosto, verificando que a umidade média após a centrifugação foi de 87% e pH de 6,7. Observa-se também que os elementos encontrados em maior quantidade pelas análises químicas e de Raios X, foram alumínio, sílica e ferro. No geral, as características do lodo gerado nesta ETA não variaram nos meses estudados.

Portella et al. (2003) apresentam os resultados da caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba/PR. As tabelas II.1 e II.2 mostram os teores de umidade e análise química por Fluorescência de Raios X e Espectrofotometria de Absorção Atômica para os lodos avaliados pelo autor.

Tabela II.1 - Teor de Umidade e pH das amostras de lodo de ETA

Amostra	Umidade (%)	pH
Lodo 01	87,5	7,02
Lodo 02	86,4	6,46

Tabela II.2 - Análise química por Fluorescência de Raios X e Espectrofotometria de Absorção Atômica.

Elementos (%)	Lodo 01	Lodo 02
SiO₂ *	14,1	12,75
Al₂O₃*	23,62	20,8
TiO₂	0,35	0,68
Fe₂O₃*	8,39	7,58
MgO	0,15	0,42
CaO	0,33	0,36
Na₂O	<0,02	0,1
K₂O	0,11	0,27
P₂O₅	0,34	0,69

Outros elem. não detectados	3,6	5,23
------------------------------------	-----	------

* Elementos analisados por Espectrofotometria de Absorção Atômica com atomização em chama

II.4 - Impactos ambientais e toxicidade de lodo de ETAs

A destinação final inadequada dos resíduos sólidos gerados nas estações de tratamento de água causam danos ao meio ambiente. O despejo dos lodos de ETA nos corpos hídricos alteram as características físico-químicas da água, aparentemente alterando sua cor e, conseqüentemente, aumentando a turbidez e a toxicidade provável das substâncias que compõem o lodo.

Os resíduos provenientes das estações de tratamento de água podem causar prejuízos como a salinização do solo, acúmulo de metais, lixiviação de nitratos na água, elevação da turbidez, comprometimento dos processos fotossintéticos, elevação da matéria orgânica, conseqüentes incidentes de mortandades de organismos aquáticos, comprometendo a fauna e a flora aquáticas como um todo. Segundo o autor, vale salientar que o potencial tóxico atribuído ao lodo de ETA está relacionado aos metais presentes em sua composição, tal como o alumínio (SOARES et al., 2009).

Para se determinar o potencial de toxicidade dos lodos das estações de tratamento de água devem-se avaliar fatores como: características de água bruta, produtos químicos utilizados no tratamento e seus possíveis contaminantes, reações químicas ocorridas durante o processo e forma de remoção e tempo de retenção dos resíduos nos decantadores. Além desses aspectos, devem-se considerar as características hidráulicas, físicas, químicas e biológicas do corpo receptor (CORDEIRO, 1999).

O lodo de ETA, em função da adição de produtos químicos, podem apresentar metais como (Cu, Ni, Zn, Pb, Cd, Cr, Mn) e em especial o alumínio. Esses apontam para potenciais ações tóxicas, podendo influenciar nas técnicas de tratamento, disposição e reutilização desses resíduos (BARROSO E CORDEIRO, 2001).

Devido à presença de sais de ferro ou alumínio, os lodos de ETA quando lançados nos cursos d'água afetam a qualidade ambiental, aumentam a toxicidade

prejudicial à camada bentônica e peixes, causando impactos na economia e na vida das populações que se beneficiam do recurso hídrico (ACHON et al.,2005).

II.5 - Destinação final de lodo da ETA

A disposição final inadequada dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água contraria a legislação vigente, além de causar impactos negativos à saúde do homem e ao ambiente como um todo. O aproveitamento deste resíduo vem sendo estudado e várias são as alternativas para solucionar este problema. É importante ressaltar que as características físicas e químicas do lodo devem ser avaliadas, pois, a partir desta avaliação,que será definido qual o destino mais adequado para o resíduo em questão.

A disposição final do lodo de ETA deve ser avaliada para que sejam econômica e ambientalmente viáveis. Dentre as alternativas possíveis, segundo Reali (1999), Tsutiya e Hirata (2001), Januário e Filho (2007), é possível citar as seguintes: disposição em aterros sanitários,co-disposição com biossólidos,disposição controlada em certos tipos de solo,aplicações industriais diversas como a de materiais cerâmicos ou cimento e incineração de resíduos.

A disposição do lodo de ETA no solo deve ser avaliada principalmente em função das características físicas e químicas do lodo e o tipo de aplicação ou cultura a qual este resíduo será adicionado, principalmente por existir nutrientes benéficos às diversas culturas como também por apresentar teores mais elevado de alguns metais, principalmente o alumínio.

Para Reali (1999), a aplicação dos resíduos de ETA no solo deve ser controlada, pois o lodo com alto teor de alumínio, que possui grande afinidade com o fósforo, pode indisponibilizá-lo para as plantas.

Segundo Megdaet al. (2005) e Tsutiya e Hirata (2001), a aplicação do lodo no solo tem sido utilizado no cultivo de grama comercial, como gramas para jardinagem, atividades esportivas e outros. O lodo pode ser aplicado na fase líquida ou desidratado, neste tipo de aplicação deve-se levar em conta o acúmulo de metais no solo e a absorção de nutriente.

A disposição do lodo em aterros sanitários consiste em uma prática segura, quando este se encontra dentro dos padrões estabelecidos pela legislação vigente. Tendo em vista a toxicidade que alguns resíduos de ETA podem apresentar em função da quantidade de metais presentes no lodo, os aterros sanitários podem ser colocados como uma opção eficiente.

Para encaminhar o lodo de ETA aos aterros sanitários é necessário que a concentração de sólidos na torta seja superior a 25% (REALI 1999).

Quando o lodo de ETA apresenta resíduos perigosos ou possui metais pesados, estes são co-dispostos em aterros sanitários sofrendo um processo de estabilização e sua fase orgânica pode ser degradada. Assim como outros resíduos industriais, o lodo de ETA exerce influência no processo de estabilização dos aterros sanitários (BIDONE et al., 2001).

A incineração é um método cujos custos são consideravelmente elevados em relação as outras técnicas e por não resolver integralmente o problema, já que restam cinzas a serem dispostas em aterros, apesar de diminuir significativamente seus volumes finais.

A principal vantagem da incineração é a redução do volume do resíduo, pois as cinzas decorrentes da incineração representam cerca de até 10% do seu volume total. Este método tem crescido nos países desenvolvidos devido à dificuldade de construção de novos aterros sanitários (SABBAG e MORITA, 2002).

Alternativas têm sido estudadas a fim de aproveitar o resíduo gerado em ETA em outros segmentos industriais, tais como a fabricação de tijolos e a incorporação em matrizes cerâmicas e cimentícias.

Megda (2005), afirma que o lodo de ETA possui características físicas e químicas semelhantes às características dos materiais utilizados na fabricação de tijolos. As grandes quantidades de lodos gerados em ETAs podem diminuir significativamente a quantidade de argila e xisto utilizados na fabricação de tijolos, aumentando a vida útil das jazidas naturais. Segundo a autora, a presença de cal no lodo pode inviabilizar sua aplicação para fabricação de tijolos, comprometendo sua qualidade.

Sales e Cordeiro (2001) aproveitaram o lodo da estação de tratamento de ETA na fabricação de concreto e observaram, por meio dos valores obtidos nos ensaios de absorção e resistência à compressão axial, que o lodo

adicionado ao concreto (em diversos traços) pode ser utilizado em aplicações não-estruturais, onde o desempenho mecânico e à durabilidade se encontram dentro dos valores permitidos para esta finalidade.

Hoppen et al. (2005), avaliou a aplicação de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água de Passaúna, localizada na região metropolitana de Curitiba em matriz de concreto substituindo parcialmente os agregados miúdos e o cimento. Para estudos de dosagem utilizou traços de concreto com teores de 3, 5, 7 e 10% de lodo, verificando que o concreto com até 5% de lodo podem ser aplicados em na fabricação de artefatos e blocos até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland e nas misturas com teores acima de 5%, a sua utilização é restrita, tendo aplicações em contra-pisos, calçadas e pavimentos residenciais.

Oliveira et al. (2004) analisaram o lodo proveniente da Estação de tratamento de água de Campos de Goytacazes/RJ. Constatou-se pela análise por Fluorescência de Raios X que o lodo é constituído basicamente por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A análise granulométrica mostrou uma morfologia irregular das partículas e larga distribuição de tamanho entre 1 a 425 μm . Os autores concluem que as características das argilas encontradas na região de Campos de Goytacazes são semelhantes as do lodo estudado sendo possível sua aplicação em argilas de cerâmica vermelha, porém, em concentrações pré-determinadas.

Em sua pesquisa, Teixeira et al. (2006), avaliaram a adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. As características físico-químicas e mineralógicas do lodo foram analisadas e as propriedades físico-mecânicas do corpo de prova fabricado com o lodo de ETA. Os resultados desta pesquisa mostra que o lodo de ETA pode ser incorporado à massa cerâmica usada para produzir tijolos e telhas. Os resultados obtidos com lodo ETA coagulado com sais de alumínio foram sempre piores que os coagulados com sais de ferro. Segundo os autores, as propriedades do lodo e da argila irão definir a possibilidade ou não de incorporação e a concentração desta, para cada temperatura de queima.

Margem et al. (2006) avaliaram a influência da adição do lodo de ETA em cerâmica vermelha. As composições analisadas foram de 0, 5, 10, 20 e 30% em peso de lodo incorporado em massa de cerâmica vermelha argilosa. Verificou-

se, através de ensaios físicos e mecânicos, que os corpos de prova obtidos após queima à temperatura de 900°C tinham sua qualidade diminuída com o aumento do teor de lodo na composição da massa cerâmica, aumentando a absorção de água e reduzindo a resistência mecânica.

Paixão et al. (2008) investigaram os efeitos da adição de um lodo de ETA nas características físicas e mecânicas de uma cerâmica preparada com massa argilosa (cerâmica vermelha). Observou-se que, em temperaturas de queima inferiores a 1000 °C, as propriedades físico-mecânicas dos corpos cerâmicos foram afetados, aumentando a absorção de água e diminuindo a resistência à flexão. Segundo os autores, este fato pode ser explicado pela diferença entre o tamanho das partículas de lodo e da argila, o que levou à formação de microtrincas ao redor das partículas do lodo, que pouco interagiu com a matriz argilosa.

II.6 - As microesferas de vidro proveniente da câmara de jateamento

O jateamento é um método de preparação de superfícies difundido como ferramenta industrial e usado como tratamento mecânico superficial. Essa ferramenta remove todo e qualquer tipo de revestimentos, carbonização e contaminantes com aplicação no processo de limpeza nas áreas industriais, automotiva, ferroviária, naval, aeronáutica e rodoviária. A superfície fica, então, limpa, facilitando o tratamento químico da mesma, como na decapagem química, removendo rebarbas das peças usinadas e areia de fundição remanescente das peças moldadas.

O jateamento com areia, a partir de 2004 tornou-se proibido de acordo com o Decreto nº 5.063 (2004), do Ministério do Trabalho e Emprego, uma vez que esse processo gera uma elevada concentração de sílica cristalina (quartzo), responsável por uma alta incidência de quadros graves de silicose e comprovadamente cancerígena. Com isso, surgiram vários materiais substitutos à areia nas câmaras de jateamento, um deles, a microesfera de vidro (FRANCO, 2011).

As microesferas de vidro utilizadas na câmara de jateamento são constituídas por sílica amorfa com baixa toxicidade. Sua obtenção se dá pela fusão de vidro selecionado e entre as principais características pode-se citar que trata-se de um material que não reage com a grande maioria das substâncias, possui

característica abrasiva, forma esférica, densidade elevada, dureza e resistência, situa-se entre 5 e 7 na escala MOHS (TOLEDO, 2006).

O processo de deposição eletrolítica geralmente exige que as peças sejam submetidas primeiramente ao setor de limpeza mecânica na câmara de jateamento, onde as microesferas de vidro são lançadas em alta velocidade contra as peças metálicas com o objetivo de retirar, através do efeito abrasivo, carepas e asperezas, assim como sujidades presentes na superfície da peça. Após a utilização das microesferas de vidro no processo de limpeza mecânica, elas partem-se após algumas vezes de reuso, perdendo a sua propriedade de remoção, sendo então descartadas. Apesar de haver um arraste de metais e sujeiras das peças, sua característica original não se altera muito, permanecendo com a mesma composição química (BORGIO, 2005).

A ABNT NBR-10004/2004 classifica as microesferas de vidro como resíduo sólido inerte, classe II B. No entanto, por se tratar de um resíduo industrial, não pode ser reaproveitado no próprio processo de obtenção do vidro por vários inconvenientes, entre eles a geração de bolhas no material, pois as microesferas possuem ar adsorvido nas partículas. Mesmo sendo considerado um material inerte, se disposto em rios pode aumentar o pH e a turbidez da água (LUZ e RIBEIRO, 2004), além de não ser biodegradável e assorear os rios.

Luz e Ribeiro (2008) investigaram acerca do uso do pó de vidro como resíduo industrial inerte incorporado a misturas cerâmicas e verificaram que tem um bom potencial como novo fundente para substituição do tradicional feldspato, tornando possível a obtenção de uma fase vítrea durante a queima do grês porcelanato.

TOLEDO (2006) baseou seu trabalho no reaproveitamento dos resíduos de areia de fundição e microesferas de vidro. Como matéria-prima, é viável na fabricação de cerâmica vermelha e constatou uma melhora nos resultados físicos e mecânicos quando se trabalha com concentrações de 65% de areia de fundição, 10% de microesferas de vidro e 25% de argila natural, submetida à temperatura de 1230°C por 1 hora de queima.

OLIVEIRA et al. (2004) avaliaram a viabilidade da incorporação de vidro na cerâmica vermelha. As concentrações utilizadas foram de 3%, 5%, 7% e 10% e observou-se a diminuição da retração linear de secagem e queima, bem como a

diminuição do ponto crítico de secagem pela curva de Bigot (Adupt BORG, 2005).

Almeida et al. (2010), em seus estudos, reaproveitaram resíduos da poeira da câmara de jateamento (microesfera de vidro) na fabricação de cerâmica vermelha, obtendo resultados satisfatórios indicando que o material cerâmico obtido apresentava alta resistência.

O efeito da adição de pó de vidro de origens diversas nas proporções de 13% e 20% na massa cerâmica para fabricação de telha foi analisado por GODINHO et al.,(2006). Nesse estudo, destaca-se a tensão de ruptura que é positivamente influenciada utilizando-se métodos de mistura do vidro e da massa argilosa que promovem melhor dispersão.

II.7 - A indústria cerâmica vermelha

A história da Cerâmica Vermelha remonta de cerca de sete mil anos na história da humanidade, no Oriente Médio. Inicialmente, utilizou-se o tijolo de adobe (cerâmica crua) como substituto das pedras de cantaria. Embora de menor durabilidade, apresentou a vantagem de uma maior trabalhabilidade da argila na execução dos elementos e destes mesmos na composição das alvenarias.

Especificamente para a Indústria da Construção Civil, a denominação de Cerâmica Vermelha engloba produtos como tijolos e blocos para alvenaria, além de telhas, pisos, vasos decorativos, entre outros. Geralmente, ao se falar da cerâmica vermelha constitui-se um grupo de produtos rústicos onde o acabamento dificilmente ocorre.

A grande importância deste setor econômico está nas propriedades que possuem seus produtos como materiais auto-estruturados e, por isto, estão intimamente ligados à edificação.

O processo para a fabricação de elementos cerâmicos vermelhos é bastante conhecido, seu domínio é milenar e apresenta pequenas variações para a obtenção dos diferentes produtos.

É caracterizada por duas etapas distintas, quais sejam, a primária (que envolve exploração da matéria-prima - neste caso, a argila) e de transformação (para elaboração do produto final). Independentemente de essas fases serem ou

não desempenhadas pela mesma empresa, elas estão intimamente interligadas e interferem no desempenho de toda a cadeia produtiva.

As argilas ideais para a fabricação dos produtos de cerâmica vermelha devem, de modo geral, ser de fácil desagregação, apresentar distribuição granulométrica conveniente, adequada combinação entre materiais plásticos e não plásticos e possuir teor de matéria orgânica que possa conferir, juntamente com a granulometria, boa plasticidade e resistência mecânica suficiente para evitar deformações e quantidade possível de água no processo de conformação. A redução no teor de água utilizado no processo de extrusão, sem prejuízo da plasticidade e trabalhabilidade das massas cerâmicas e das propriedades cerâmicas das peças úmidas, secas e após queima, acarretará uma redução diretamente proporcional nos gastos energéticos com a secagem. A redução no teor de água também implicará diretamente na diminuição dos problemas de trincas e empenamentos que ocorrem na etapa de secagem.

A plasticidade de um sistema pode ser definida com a propriedade de se deformar pela aplicação de uma força e manter essa deformação após a retirada dessa força. No sistema argila-água, a plasticidade é função da granulometria das partículas, da força de atração entre as partículas de argilominerais, da presença de matéria orgânica e da ação lubrificante da água. De forma geral, a plasticidade se desenvolve quando a argila apresenta água suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais com uma água não orientada, que age como meio lubrificante facilitando o deslizamento das placas dos argilominerais umas sobre as outras quando uma tensão tangencial é aplicada.

No processo de fabricação são geralmente usados ciclos de queima lentos, que podem chegar até 60h (frio a frio), dependendo do produto fabricado (Donde,1998). Ressalta-se que é na etapa de queima que ocorre a sinterização do material, transformando a massa argilosa conformada em um produto cerâmico. Este processo é irreversível. O material cerâmico após a queima é considerado inerte até a sua temperatura de obtenção.

Considerados seu baixo custo e pouca exigência de qualificação em sua aplicação, as cerâmicas vermelhas representam o maior volume de movimentação de materiais na grande maioria de construções correntes no Brasil.

Baseado neste fato, a evolução do mercado da indústria de cerâmica vermelha se faz necessária para se adequar às mudanças que ocorrem atualmente na indústria da construção civil nacional, onde a demanda por produtos de alto padrão tecnológico e de baixo custo está cada vez mais determinando o sucesso de uma indústria.

II.8 - Incorporação de outros resíduos à cerâmica vermelha

Uma alternativa viável que a indústria cerâmica vermelha pode aplicar para atenuar o alto consumo de argila é o uso de resíduos industriais incorporados às massas argilosas como matérias-primas alternativas. A incorporação, quando realizada com sucesso, pode melhorar a qualidade do produto final, diminuir o consumo de matérias-primas naturais, diminuir o custo de produção e, principalmente, contribuir para minimização do impacto ambiental.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos relacionados à incorporação de resíduos industriais poluentes em massas argilosas para a fabricação de cerâmica vermelha. Entre os vários resíduos investigados destacam-se: resíduos do setor siderúrgico, resíduo de boro, resíduo de curtume, resíduos da indústria de galvanização e de lodos de estação de tratamento de água, entre outros (Souza, V.P., 2008).

Em geral, estes trabalhos estão relacionados às mudanças estruturais e físicas que estes resíduos provocam no produto cerâmico.

A reciclagem é o processo pelo qual o resíduo é transformado em matéria prima. Segundo Teixeira (2001), "(...) com a reciclagem obtém-se um resgate daqueles resíduos que ainda podem ter utilidade e, desta forma, reduz-se a quantidade de resíduos que terão que ser adequadamente dispostos".

As principais vantagens de reciclar, na percepção de Tocchetto (2000), são a diminuição da carga poluente enviada ao meio ambiente, de menores investimentos em instalações de tratamento de rejeitos, diminuições dos custos de produção e maior competitividade e produtividade das empresas.

Quando não for possível assegurar a reutilização dos produtos, ou melhor ainda, evitar a produção do resíduo, a reciclagem é uma alternativa tecnológica viável. A introdução novamente de resíduos industriais em processo produtivos

prioriza a busca permanente de adequação conforme as características desses resíduos, proporcionando a elevação do grau de recuperação e poupando gastos energéticos e a retirada de matéria-prima da natureza para obtenção do produto final.

III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 - MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização da parte experimental desta pesquisa foram utilizadas as seguintes matérias primas:

- Argila
- Lodo proveniente da estação de tratamento de água
- Microesferas de vidro da câmara de jateamento.

III.2 - TRATAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A argila in natura apresenta-se de forma geral em torrões ou em grandes grãos sendo submetida ao processo de cominuição. Com esta finalidade foi utilizado um pulverizador de disco da marca DENVER. Esta etapa teve como objetivo diminuir o tamanho dos grãos, tornando a argila mais homogênea. As microesferas de vidro, oriundas de processo de jateamento do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química da UFRJ, foram utilizadas sem qualquer tratamento depois de seu uso na câmara de jateamento.



(a) (b)(c)

Figura II.1 - (a) argila triturada, (b) lodo in natura da ETA e (c) microesferas de vidro.

O lodo é proveniente da etapa de decantação da Estação de Tratamento de Água localizada em Petrópolis. Foi seco em estufa e em seguida submetido ao

processo de cominuição em um pulverizador de disco marca DENVER. Esta etapa teve como objetivo desagregar os torrões de lodo formados após a etapa de secagem.

III.2.1 - Análise granulométrica das matérias-primas

A análise granulométrica fornece a distribuição percentual, em peso, dos tamanhos dos grãos que constituem o material, ou seja, permite identificar o tamanho e a distribuição dos grãos.

Em virtude do processo de pulverização, as matérias-primas foram classificadas e quantificadas granulometricamente, utilizando um *rot-up*(MARCONI), dotado de um jogo de peneiras ABNT de 100, 115, 170, 200, 270 e 325 mesh para a argila e para o lodo. Para as microesferas de vidro, peneiras de 170, 200, 270, 325 e 400 mesh.

III.3 - CARACTERIZAÇÃO ELEMENTAR DAS MATÉRIAS-PRIMAS

III.3.1 - Determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade foi realizado em uma estufa a 80 °C. A amostra, com massa inicial conhecida, foi levada para a estufa para perda de umidade por 24 horas e, após secagem, a massa final foi determinada até peso constante. Mediante esses valores, obteve-se, através da equação III.1, o teor de umidade presente nas matérias-primas.

$$\text{Teor de Umidade (\%)} = \left(\frac{M_U - M_S}{M_U} \right) \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Onde:

M_U - Massa de resíduo úmida (em g);

M_S - Massa de resíduo seca (em g).

III.3.2 -Caracterização mineralógica

A caracterização das matérias-primas argila, lodo da ETA e das microesferas de vidro foram realizadas empregando-se métodos físicos de Fluorescência de Raios X (FRX), Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

III.3.2.1 - Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

O princípio da técnica consiste em transições eletrônicas, onde os elétrons das camadas mais externas dos átomos, quando atingidos por radiação, são expulsos, fazendo com que os átomos se ionizem. Ocorrem, então, transições entre camadas dentro dos íons formados, fazendo com que os mesmos emitam Raios X, cuja intensidade é caracterizada para cada elemento existente.

O espectro obtido por indução de certa amostra, isto é, FRX, foi interpretado. A intensidade do espectro é proporcional à quantidade do elemento presente. Esta técnica foi utilizada para a determinação dos teores dos elementos na forma de óxidos.

A análise química por Fluorescência de Raios X foi realizada em um espectrômetro de Fluorescência de Raios X (RIGAKU) do Laboratório Núcleo de Catálise – NUCAT – da COPPE.

III.3.2.2 - Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A técnica de Espectrometria na região do infravermelho é amplamente utilizada para investigar espécies moleculares de todos os tipos. A técnica se baseia na interação da radiação infravermelha com as vibrações moleculares do material em investigação. Para que ocorra uma absorção na região do infravermelho são necessários dois requisitos: (1) a frequência da radiação eletromagnética deve coincidir com a frequência de um dos modos vibracionais natural da molécula constituinte do material (ressonância), quando isto ocorre, a molécula passa a oscilar com amplitude de oscilação maior, como num sistema

massa-mola; (2) A vibração normal que está interagindo com a radiação tem que provocar variação no momento de dipolo elétrico da molécula. Se esta última condição não for satisfeita, diz-se que esta vibração normal não é ativa no infravermelho.

O equipamento utilizado foi Espectrômetro da Perkin Elmer modelo Spectrum 100 e a análise foi realizada com o módulo de ATR (Attenuated Total Reflectance) com 32 scan e 4 cm^{-1} de resolução na faixa de 4000 a 550 cm^{-1} .

III.3.2.3 - Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

O DSC foi desenvolvido com o intuito de evitar as dificuldades encontradas no DTA ou compensá-las, criando um equipamento capaz de quantificar a energia envolvida nas reações.

Existem dois tipos de equipamentos que realizam a Calorimetria Diferencial de Varredura, o primeiro é denominado de DSC de compensação de energia e o segundo de DSC de fluxo de calor, que foi o utilizado.

No DSC por compensação de energia, a amostra e a referência são colocadas em compartimentos diferentes com fontes de aquecimento individuais, onde a temperatura e a energia são monitoradas e geradas por filamentos de platina idênticos, atuando assim como termômetros resistivos e aquecedores.

Esta técnica mantém constante o calor fornecido. Porém, ao invés de medir a diferença de temperatura entre a amostra e a referência durante a reação, um sistema de controle aumenta imediatamente a energia fornecida para a amostra quando o processo é endotérmico, e aumenta a energia fornecida para a referência quando o processo é exotérmico, conservando assim a amostra e a referência com a mesma temperatura.

Um gráfico da energia fornecida pelos aquecedores é formado, possibilitando quantificar as transformações uma vez que a compensação de calor é proporcional à energia envolvida na reação (Wendhausen).

O equipamento utilizado para a realização deste ensaio foi o TA SDT Q600 do Laboratório de Tecnologia de Hidrogênio/EQ.

III.3.2.4 - Difração de Raios X (DRX)

A utilização da técnica de difração de Raios X tem como finalidade a identificação da estrutura cristalina. O equipamento de DRX é basicamente um tubo emissor de RaiosX, uma câmara circular onde se situa a amostra (goniômetro) e um detector que recebe os raios difratados. A técnica de ensaio consiste em incidir um feixe de RaiosX de comprimento de onda conhecido (λ) sobre uma camada fina e homogênea de pó, que gira no centro do goniômetro variando o ângulo de incidência (θ). Como consequência, o feixe se difrata e reflete com ângulos que são característicos do retículo cristalino, obtendo-se o difratograma correspondente. As análises foram realizadas utilizando o método do pó, com radiação $K\alpha$ do cobre e varredura entre os ângulos de 10 a 90° (2θ).

O equipamento utilizado foi um Difratorômetro de Raios-X (RIGAKU, modelo MiniFlexIII), do Laboratório de Caracterização de Materiais – LACMAT – da Escola de Química.

III.3.2.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A utilização desta técnica permite realizar um estudo das características superficiais e da morfologia das partículas. Quando uma radiação é empregada para iluminar um objeto, o valor limite do poder de resolução é definido pelo comprimento de onda da radiação. No microscópio eletrônico, ao invés da luz visível, a amostra é bombardeada com um feixe de elétrons altamente energético, permitindo, portanto, um poder de resolução bem mais elevado que na microscopia ótica.

Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura JSM6460LV JEOL. O microscópio possui um sistema de EDS (Energy Dispersive X-RaySpectrometer) utilizado para quantificar e qualificar os elementos químicos, além de permitir o mapeamento dos mesmos em toda a área selecionada.

III.4 - CONFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIO DE QUEIMA

Os corpos de prova foram preparados com as misturas das frações de argila e lodo obtidas no processo de cominuição e das microesferas de vidro sem qualquer tratamento. O método utilizado para a determinação correta da proporção de: argila, argila + lodo, argila +microesferas de vidro + lodo e água foi de tentativa e erro. Em função dos dados da literatura, que apontam o valor máximo de substituição de lodo de ETA na argila ser de 10%, estabeleceu-se que as quantidades a serem utilizadas de lodo e microesferas de vidro seriam respectivamente 5% e 10% em relação à massa de argila empregada no preparo dos corpos de prova (20g de argila).

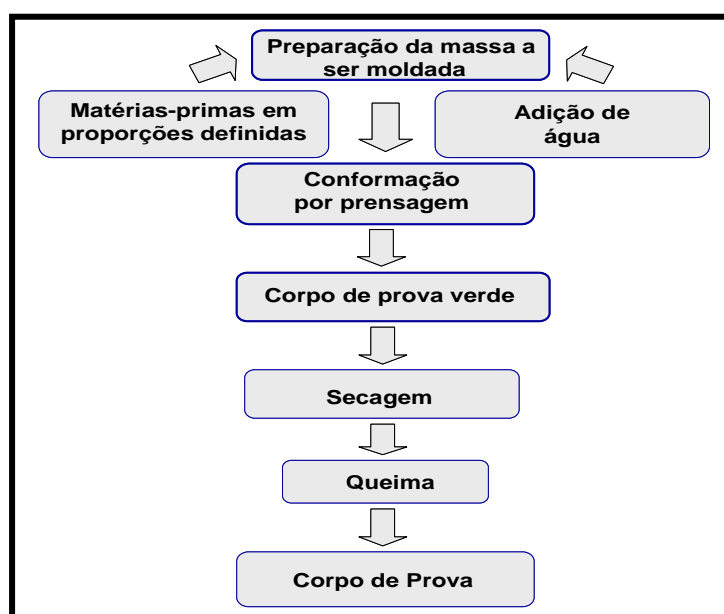


Figura III.2 – Diagrama das etapas concretizadas até a realização dos ensaios tecnológicos.

Deste modo foram preparadas diferentes misturas:

- Argila 100% (AP)
- Argila 90% e Lodo 10% (L10)
- Argila 90%, Microesferas de Vidro 5% e Lodo 5% (M5L5)
- Argila 80%, Microesferas de Vidro 10% e Lodo 10% (M10L10)

As misturas preparadas formaram massas cerâmicas, as quais foram conformadas através de compactação (prensagem) em uma matriz retangular de aço inox, com medidas de 60 mm de comprimento, 20 mm de largura e 5 mm de espessura (Figura III.3), sob uma pressão de 200 kgf/cm² conforme aplicado no

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (SANTOS, 1989), conferindo uma maior estabilidade dimensional da peça cerâmica.



Figura III.3 – Matriz retangular de aço inox utilizada na compactação dos corpos de prova.

Em seguida, os corpos de prova foram colocados dentro do forno elétrico para serem calcinados, nas temperaturas previamente determinadas de 900, 1000 e 1100 °C durante o período de 2 horas. Após o resfriamento dos corpos de prova, decorrente de convecção natural, foi feita nova pesagem (M_F – Massa Final após a queima) e medição dos mesmos (L_F , C_F e E_F – Largura, Comprimento e Espessura Finais após a queima) seguindo a mesma metodologia aplicada anteriormente.

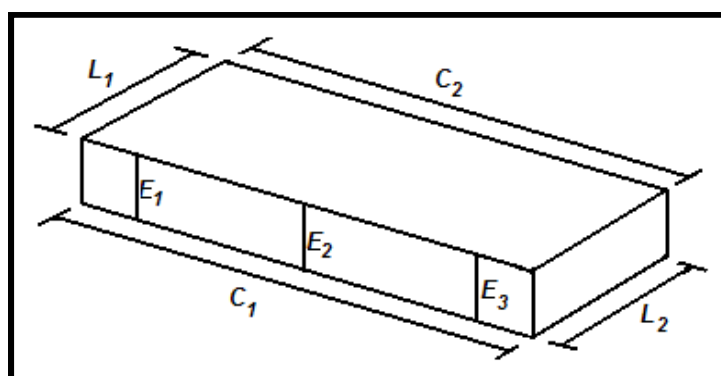


Figura III.4 – Pontos estabelecidos para a determinação das medidas.

Com base nos valores obtidos foi possível determinar a Retração Linear (RL), a Absorção de Água (AA), a Porosidade Aparente (PA), a Densidade (D) e a Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) dos corpos de prova.

III.5 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA

Durante o processo de fabricação de cerâmica, especificamente em sua queima, reações termicamente ativas se processam no interior da massa cerâmica, promovendo a formação das fases determinantes para as características físicas e mecânicas na fase final do processo (DUTRA e PONTES, 2002).

Desta forma, através de ensaios, pode-se avaliar as propriedades do novo material cerâmico obtido.

III.5.1 - Avaliação da Retração Linear (RL)

A Retração Linear pós queima de uma peça cerâmica é determinada a partir da equação III.2.

$$RL (\%) = \left(\frac{C_I - C_F}{C_I} \right) \times 100 \quad (III.2)$$

Onde:

C_I - Comprimento inicial do corpo de prova (em cm);

C_F - Comprimento final do corpo de prova, depois de calcinado (em cm).

A retração linear de queima depende fundamentalmente da densidade aparente da peça prensada, da composição da massa e das condições de queima. O volume da peça prensada seca é a soma do volume das partículas sólidas e dos poros entre as mesmas. Na queima, durante o aquecimento, inicia-se um processo de formação de fases líquidas no interior do produto, em decorrência da fusão parcial dos componentes menos refratários presentes na massa.

O aumento da temperatura provoca a redução da viscosidade das fases líquidas, facilitando assim seu “escorrimento” para dentro dos espaços vazios entre as partículas que ainda não se fundiram, resultando em uma diminuição do volume de poros e na retração linear.

III.5.2 - Ensaio de Absorção de Água (AA)

A Absorção de Água (AA) é definida como o ganho percentual de massa que tem o corpo de prova quando absorve o máximo de água. Sua determinação é feita medindo-se o peso do corpo de prova seco e em seguida mergulhando-o em água por 24 horas, período no qual a água inunda os poros abertos. Após este período, a amostra é suspensa e a água que escorre em sua superfície é ligeiramente seca. O percentual de água absorvida é determinado através da equação III.3:

$$AA (\%) = \left(\frac{P_U - P_A}{P_A} \right) \times 100 \quad (III.3)$$

Onde:

P_U - Peso do corpo de prova úmido (em g);

P_A - Peso do corpo de prova seco (em g).

A absorção de água do material cerâmico é um parâmetro utilizado para medir a porosidade aberta e avaliar a fundência do material.

A absorção de água é um fator chave no efeito da durabilidade do tijolo. A menor infiltração de água nos mesmos determina maior durabilidade e resistência ao ambiente natural ao qual o material é exposto. Assim, a estrutura interna do tijolo precisa ter uma superfície capaz de evitar a entrada de água.

III.5.3 - Ensaio de Porosidade Aparente (PA)

A Porosidade Aparente é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente no corpo de prova. Sua medição é feita pelo método gravimétrico, segundo a equação III.4:

$$PA (\%) = \left(\frac{P_U - P_A}{P_U - P_I} \right) \times 100 \quad (III.4)$$

Onde:

P_U - Peso do corpo de prova úmido (em g);

P_A - Peso do corpo de prova seco (em g);

P_I - Peso do corpo de prova imerso em água (em g).

A porosidade final do produto é influenciada pela porosidade inicial do material recém-formado, verde, seco, da formação da fase líquida na queima e do rearranjo das fases cristalinas. O aumento da porosidade aumenta a fragilidade dos materiais, diminuindo a sua resistência mecânica, por potencializar o surgimento de falhas no material. Uma propriedade bastante relacionada com a porosidade é a absorção de água.

III.5.4 - Densidade (D)

A Densidade (D) do corpo de prova foi determinada utilizando a equação III.5:

$$D (\text{g/cm}^3) = \frac{PA}{AA} \quad (III.5)$$

Onde:

PA - Porosidade aparente do corpo de prova (em %);

AA - Absorção de água do corpo de prova (em %).

O aumento da densidade durante a compactação é uma decorrência da deformação plástica dos grânulos que, ao se deformarem, passam a ocupar os espaços vazios que havia entre eles.

III.5.5- Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão (TRF)

A Tensão de Ruptura à Flexão do corpo de prova indica a sua capacidade de suportar esforços exercidos por cargas que possam levar a rupturas, esmagamento ou quebras, sendo obtida por meio de ensaio experimental e calculada através da equação III.6:

$$\text{TRF (kgf/cm}^2\text{)} = \frac{3.P.b}{2.L.E^2} \quad (\text{III.6})$$

Onde:

P - Carga atingida no momento da ruptura (em kgf);

b - Distância entre os apoios do corpo de prova (em cm);

L - Largura do corpo de prova (em cm);

E - Espessura do corpo de prova (em cm).

Durante o aumento da temperatura de queima, antes mesmo de atingir a temperatura máxima (ideal), ocorre modificação das fases cristalinas da argila. Na temperatura máxima ocorrem reações químicas e, com isso, a formação de nova fase cristalina e fusões parciais(fase líquida) e a consolidação do material através da formação de uma estrutura que, em processo de resfriamento, se torna rígido e com mais resistência que o material seco.

IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

IV.1.1 - Análise granulométrica

A caracterização preliminar das matérias primas teve início com a análise granulométrica dos materiais utilizados nessa pesquisa. Para as microesferas de vidro, esse ensaio foi realizado após seu uso na câmara de jateamento. Para a argila e o lodo, após a etapa de secagem, foram cominuídos utilizando um pulverizador de disco. A distribuição granulométrica encontrada é apresentada na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 : Distribuição granulométrica da argila, do lodo de ETA e das microesferas de vidro.

<i>Peneira (mesh)</i>	<i>Diâmetro(mm)</i>	<i>%acumulado argila</i>	<i>% acumulado lodo da ETA</i>	<i>% acumulado microesfera de vidro</i>
100	0,149	10,03	5,33	-
115	0,125	28,93	26,31	-
170	0,088	39,90	33,85	10,30
200	0,074	49,18	41,71	16,80
270	0,053	92,39	85,64	43,00
325	0,045	95,19	90,50	91,80
400	-	-	-	92,90
fundo	<0,045	100,00	100,00	100,00

Pelos dados da Tabela IV.1 é possível verificar que, para a argila, a maior parte das partículas está na faixa granulométrica compreendida entre 0,074-0,053mm. Também se verifica que o lodo depois de seco e cominuído apresenta a distribuição semelhante à da argila. Já para as microesferas de vidro, a distribuição granulométrica se concentra na faixa entre 0,053-0,045mm.

A partir dos resultados da distribuição granulométrica das matérias primas utilizadas neste trabalho, verifica-se que a espessura dos diferentes materiais não

devem apresentar problemas de coesão entre si, vez que a diferença de granulometria não é pronunciada.

IV.1.2 - Caracterização elementar

IV.1.2.1 - Determinação do teor de umidade

Tabela IV.2 - Teor de Umidade das matérias-primas

Matérias-primas	% Umidade
Argila	0,21%
Lodo de ETA	88%
Microesfera de vidro	0,13%

Os resultados indicam que a argila e as microesferas de vidro apresentam um baixo teor de umidade. O lodo “*in natura*”, por apresentar um teor de umidade elevado, na ordem de 88%, foi submetido separadamente à secagem em temperatura ambiente, seguido de secagem em estufa.

IV.1.2.2 -Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica das matérias-primas foi realizada empregando as técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

IV.1.2.2.1 -Análise por Fluorescência de RaiosX

A composição química das matérias-primas utilizadas está apresentada na Tabela IV.3.

Tabela IV.3: Composição química elementar (FRX)

<i>Determinações</i>	<i>Argila (% em peso)</i>	<i>Lodo da ETA (% em peso)</i>	<i>Microesferas de Vidro (% em peso)</i>
SiO₂	55,65	14,66	89,68
Al₂O₃	22,58	32,26	1,27
CaO	0,38	1,63	2,73
Fe₂O₃	3,54	11,80	1,06
K₂O	2,61	0,53	0,31
MgO	0,29	-	0,96
Na₂O	0,37	-	2,99
TiO₂	1,20	0,47	-
SO₃	-	1,17	-
P₂O₅	-	2,53	-
P.F.	13,35	28,95	1

Os dados da Tabela IV.3 mostram que a argila utilizada apresenta um alto teor de sílica e alumina como é esperado para as argilas. O lodo de ETA apresenta em sua composição valores significativos de alumínio e ferro, proveniente do coagulante utilizado no tratamento da água bruta (sulfato de alumínio ferroso), e sílica que apresenta relações diretas com as características naturais dos particulados oriundos da água que chega à ETA. Já para as microesferas de vidro observa-se um alto teor de sílica (89,68%), decorrente do próprio material e dos resíduos de areia também utilizada na câmara de jateamento.

IV.1.2.2.2 -Análise por Difração de Raios X

Pelos resultados da difração de Raios X representados na Figura IV.1, observa-se presença de Quartzo(SiO_2) - JCPDS -33-1161 e a presença de Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)- JCPDS-29-1488na constituição da argila, explicitando o seu caráter cristalino.

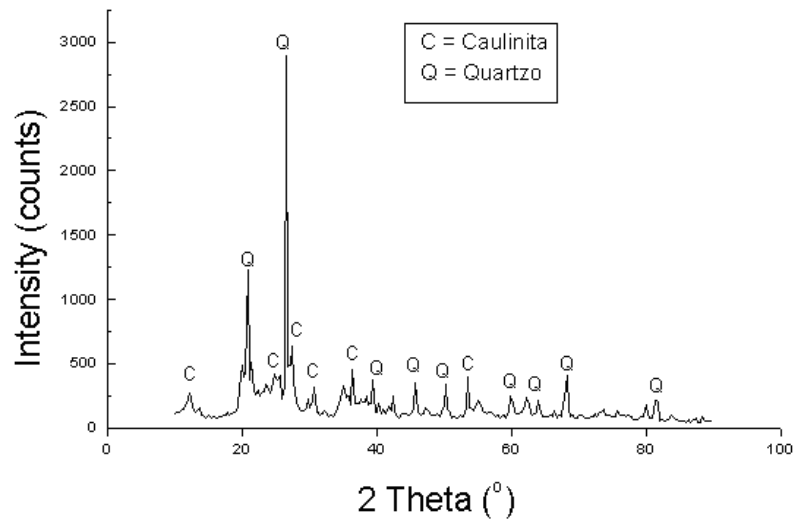


Figura IV.1 – Difratoograma da Argila

Verifica-se no lodo de ETA, pela análise de Difração de Raios X (Figura IV.2), a presença de Quartzo (SiO_2) - JCPDS -33-1161, Gibsita $\text{Al}(\text{OH})_3$ – JCPDS 33-0018 e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) - JCPDS-29-1488, além de traços de outros minerais como hematita e illita, sendo caracterizado como cristalino.

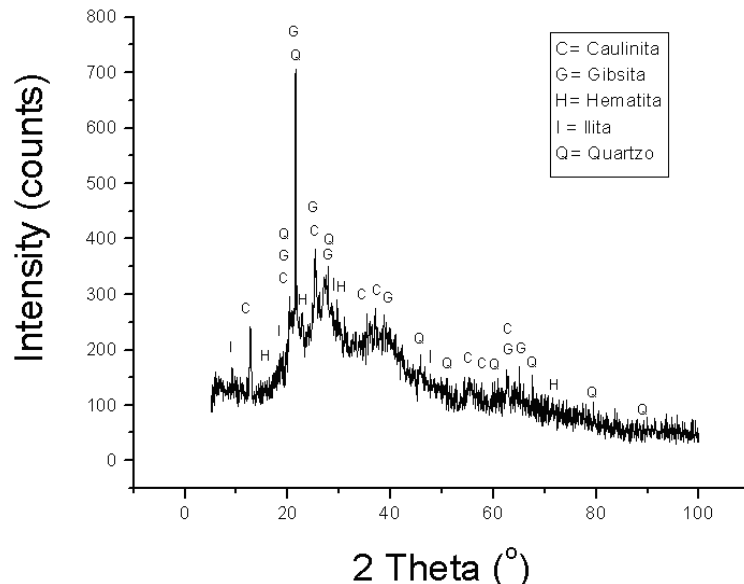


Figura IV.2 – Difratoograma do Lodo de ETA

Baseado na Figura IV.3, observa-se nas microesferas de vidro a presença de quartzo (SiO_2) JCPDS -33-1161 em sua composição, assim como os demais, cristalino.

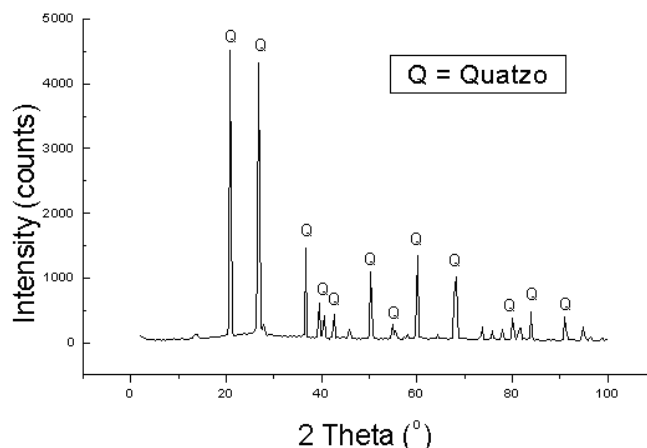


Figura3.3 – Difratograma das Microesferas de vidro

IV.1.2.2.3 -Análise por Espectrometria de Infravermelho

A grande importância de se valer da Espectrometria na região do infravermelho é que ela fornece, sobretudo, informações qualitativas de certos grupos funcionais e tipos de ligação, o que pode auxiliar no entendimento da estrutura do material. Dessa forma, a análise do espectro de Infravermelho obtido para a amostra de argila (Figura IV.4) mostrou a existência de bandas de absorção de baixa intensidade na região próxima a 3617 cm^{-1} e 3694 cm^{-1} , atribuídas ao grupo hidroxila ligado aos silicatos. Observam-se também vibrações de pequena intensidade na região de 1632 cm^{-1} referentes à flexão do grupo OH de moléculas de água. Na faixa espectral de comprimentos de 909 cm^{-1} , as bandas de absorção são atribuídas à vibração da ligação Fe-O e em 997 cm^{-1} verificou-se a presença de bandas de absorção de alta intensidade, atribuídas ao estiramento assimétrico da estrutura Si-O-Si do Quartzo (RODRÍGUEZ, et al. 2010).

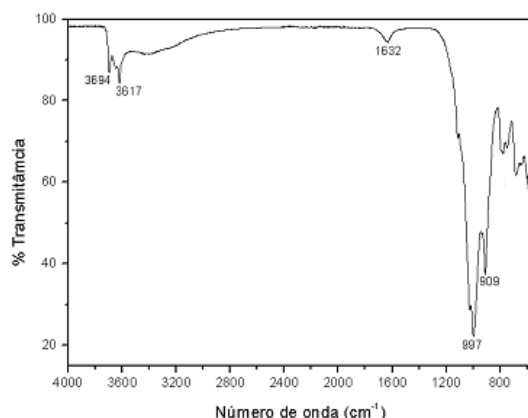


Figura IV.4 - Análise por Espectrometria de Infravermelho da argila

No espectro do lodo de ETA na região do infravermelho observa-se duas bandas de absorção pouco intensas na região de $3694 - 3612\text{cm}^{-1}$ referentes a vibrações de estiramento do grupo estrutural hidroxila ligado aos silicatos, além de moléculas de água presentes no lodo, que são invariavelmente adsorvidas por ligações de hidrogênio e também encontradas na região interlamelar. Outra banda de intensidade média em 1637cm^{-1} é atribuída à deformação angular simétrica da ligação O-H da água, confirmando a presença de água na estrutura. Uma banda de intensidade forte é observada em 1003cm^{-1} , referente ao estiramento assimétrico da estrutura Si-O-Si do quartzo e Si-O-Al da illita presente nas lamelas tetraédricas e octaédricas. Verifica-se uma banda intensa na região de 909cm^{-1} a qual foi atribuída à vibração da ligação Fe-O.

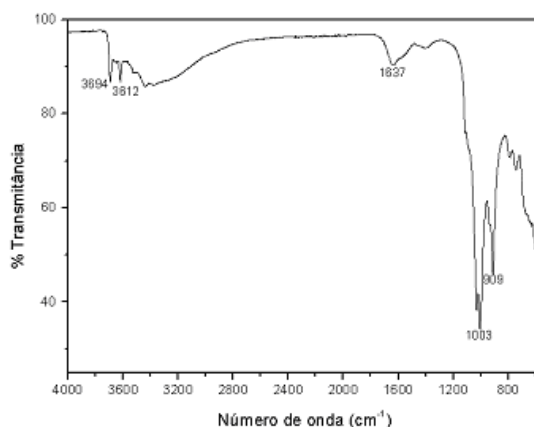


Figura IV.5 - Análise por Espectrometria de Infravermelho do lodo "in natura"

Os resultados observados na Figura IV.6 mostram que as amostras de microesferas de vidro utilizadas nesta pesquisa apresentam bandas de absorção nas regiões de 1050cm^{-1} , 774cm^{-1} e 686cm^{-1} atribuídas às vibrações das ligações Si-O do quartzo.

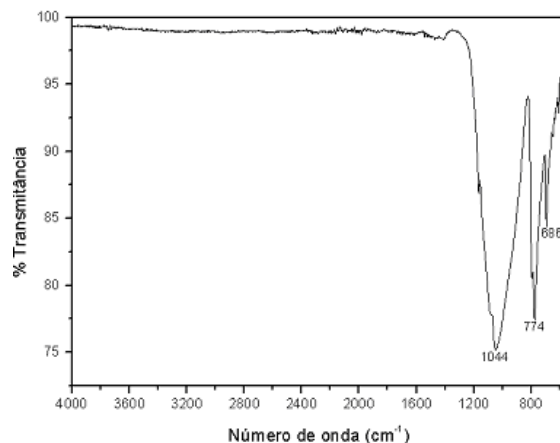


Figura IV.6 - Análise por Espectrometria de Infravermelho das microesferas de vidro

IV.1.2.2.4 -Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise microestrutural da argila está ilustrada na Figura IV.7.

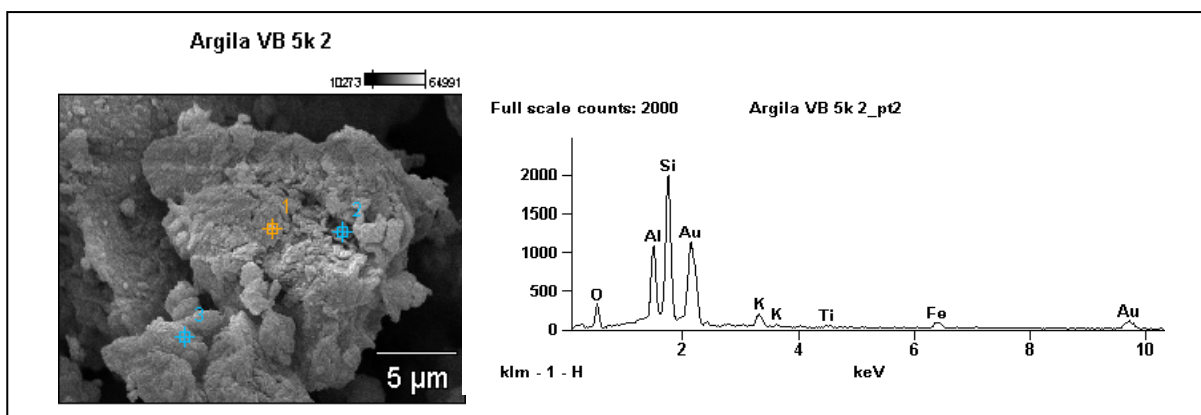


Figura IV.7 - Fotomicrografia da Argila e análise por EDS.

Observa-se na Figura IV.7 a superfície da argila pura, que apresenta um aspecto heterogêneo pouco poroso de natureza densa e formato irregular. A análise por EDS no ponto 2, assinalado em azul, mostra a presença predominante de sílica e alumina.

Na fotomicrografia do lodo, observa-se um aspecto homogêneo, denso e pouco poroso. A análise por EDS mostra a presença de sílica, alumínio, ferro e potássio, como identificado por FRX.

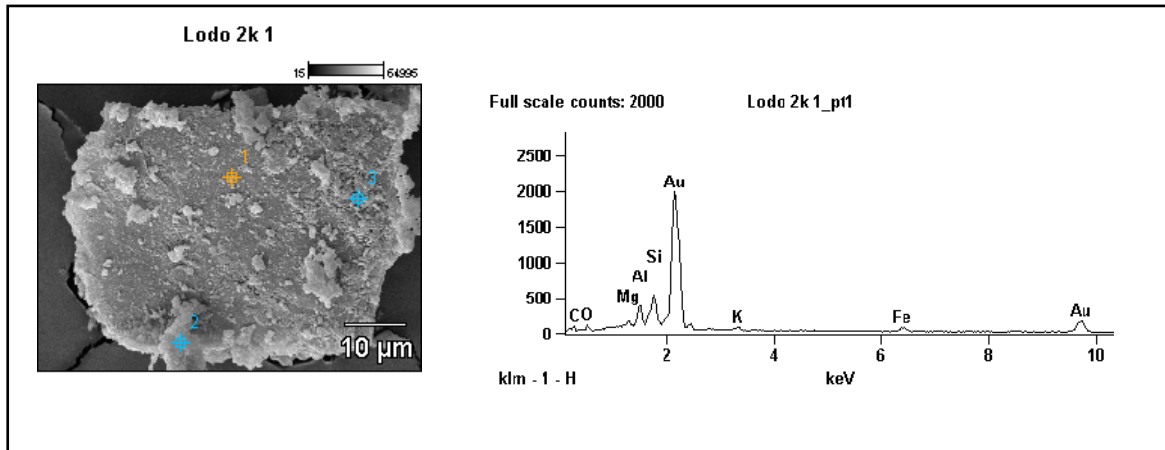


Figura IV.8-Fotomicrografia do lodo e análise por EDS.

Na Figura IV.9 (A,B,C) a fotomicrografia das microesferas de vidro e a análise por EDS.

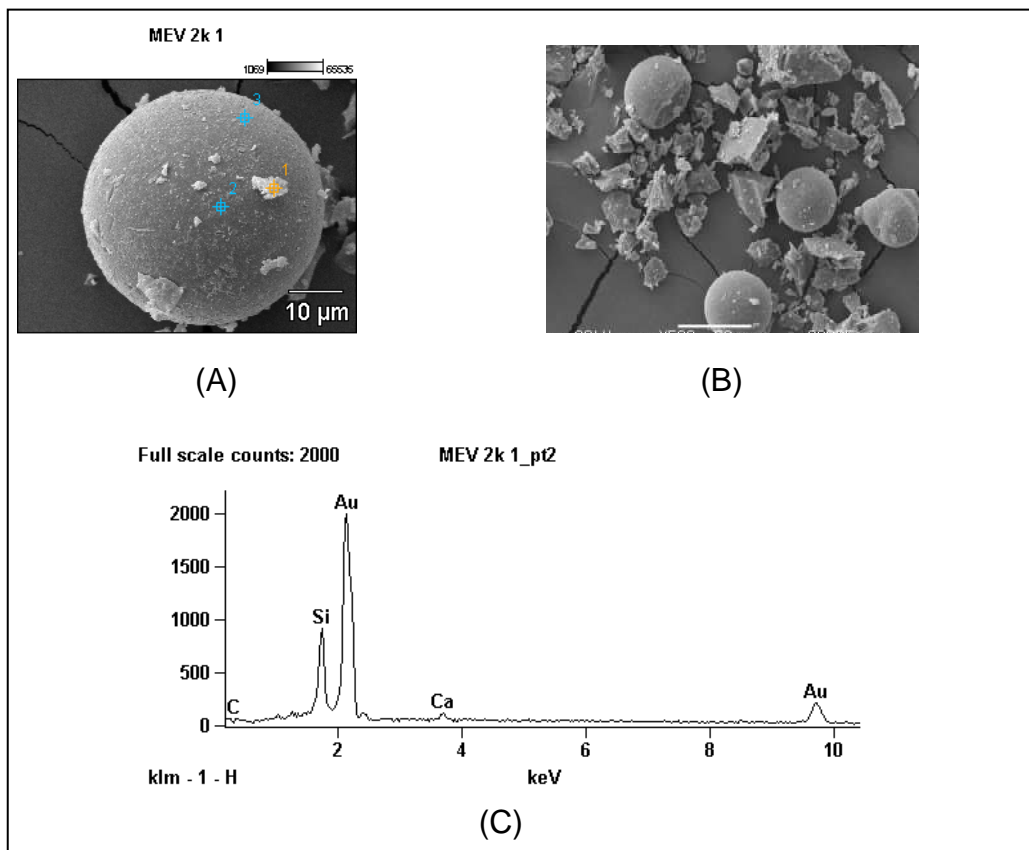


Figura IV.9 - Fotomicrografia da microesfera de vidro e análise por EDS.

Na fotomicrografia da microesfera de vidro observa-se tanto esferas maciças como também fragmentos destas, provavelmente causados pelos choques gerados na ação de limpeza mecânica na câmara de jateamento.

IV.1.2.2.5 -Análise térmica

As condições para realização da análise térmica das matérias-primas envolvem atmosfera de ar e temperatura máxima de aquecimento de 1000°C. Na Figura IV.10 verifica-se a análise termogravimétrica para a amostra de argila.

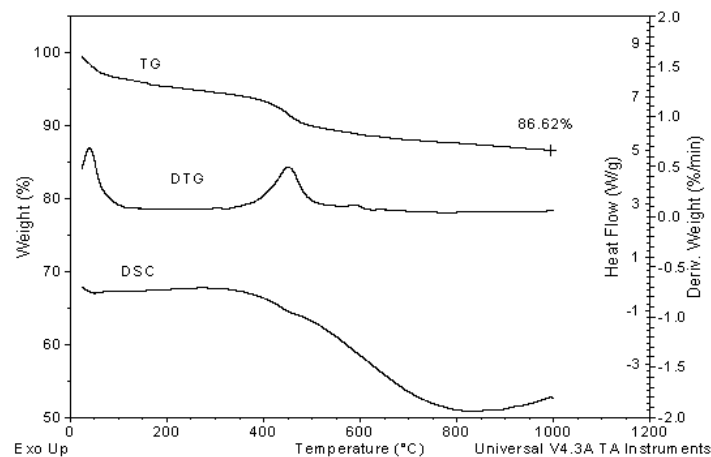


Figura IV.10 - Análise termogravimétrica da argila “in natura”.

A análise termogravimétrica realizada para a amostra de argila exibe uma perda de massa total na ordem de 13,38% até 1000°C. O pico endotérmico que ocorre até 150°C corresponde à saída da molécula de água não estrutural adsorvida nos poros da argila. A perda de massa observada a 450°C caracteriza a desidrolixação da caulinita, que é um evento endotérmico.

Por meio da análise do gráfico da Figura IV.11, verifica-se que a perda de massa total do lodo é da ordem de aproximadamente 34,97%. No período inicial observa-se a desidratação do lodo que termina a 100°C aproximadamente.

Pode ser visto, até a temperatura de 250°C, um evento endotérmico de pequena intensidade que se refere à perda de água interlamelar e à desidratação da gibsita.

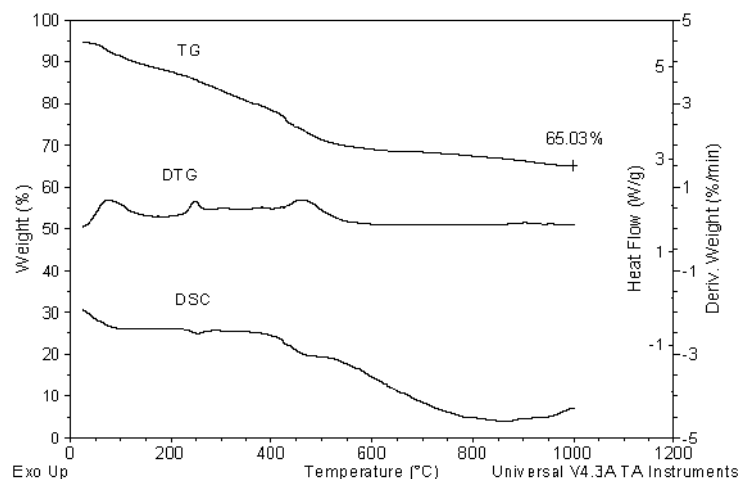
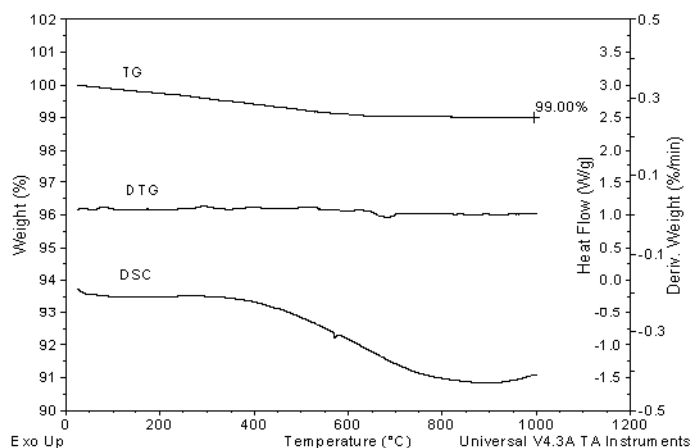


Figura IV.11 -Análise termogravimétrica do Lodo de ETA.

Em torno de 350°C a 450°C verifica-se uma perda de massa que pode estar relacionada AA presença de sulfato usado na coagulação, que perde água a temperatura maiores que 300°C. Nas temperaturas entre 450°C à 600°C, uma perda de massa é observada e pode ser relacionada à água de constituição e a desidroxilação da caulinita.

Pela análise da Figura IV.12, verifica-se que o gráfico apresentado não mostra uma perda de massasignificativa para as microesferas de vidro.Em temperaturas menores que 600°C, a perda de massa é de 1% e para temperaturas maiores que 600°C não ocorre variação da massa das microesferas de vidro, mantendo-se praticamente constante. Observa-se, na curva DSC, um pico discreto a 573°C que identifica a presença de quartzo e a transformação de sua fase cristalina.



FiguraIV.12- Análise termogravimétrica das microesferas de vidro

IV.2 - AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA APÓS A QUEIMA

Os corpos de prova foram submetidos à avaliação das propriedades físicas e mecânicas após o ensaio de queima. Esta avaliação constitui-se de ensaios de Retração Linear, Absorção de Água, Porosidade Aparente e Tensão de Ruptura à Flexão.

A caracterização mineralógica após a queima foi feita por análises de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

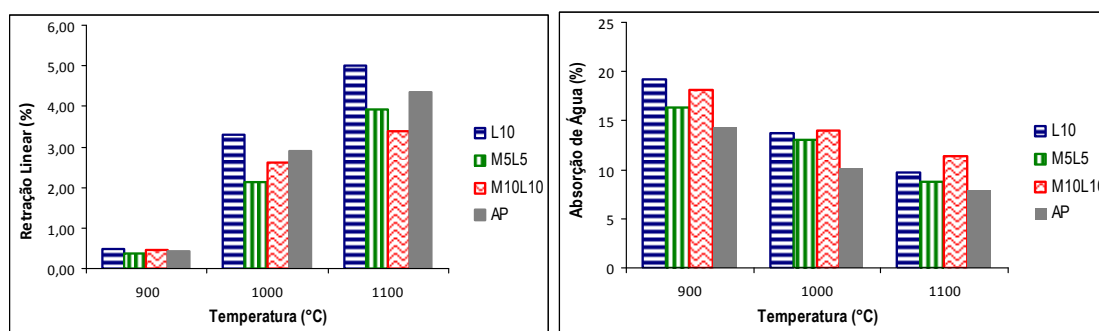
Foram definidas quatro composições para a confecção dos corpos de prova e identificados com as siglas **AP** (100% argila), **L10** (90% argila + 10% de lodo), **M5L5** (90% argila + 5% de microesferas de vidro + 5% de lodo) e **M10L10** (80% de argila + 10% de microesferas de vidro + 10% de lodo). Para cada composição de corpo de prova, foram confeccionadas 5 peças para serem queimadas em cada temperatura (900°C, 1000°C e 1100°C), totalizando 60 peças.

IV.3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA CERÂMICOS

Com o objetivo de melhor comparar todos os corpos de prova produzidos, avaliou-se as composições elaboradas com argila e lodo. Verificou-se, com os ensaios físico-mecânicos, que substituição de argila na faixa de 10% é a ideal para as peças cerâmicas.

A adição das microesferas de vidro nas composições cerâmicas pode ser justificada tendo em visto que esse material, ao fundir-se, poderia conferir maior resistência aos corpos de prova, uma vez que a massa líquida formada preencheria os poros do material. Isso ocorre devido à capacidade do vidro de fundir-se a temperaturas em torno de 1000°C.

➤ Retração Linear e Absorção de Água



(A) (B)

Figura IV.13 – Retração Linear e Absorção de Água

A partir dos dados obtidos na Figura IV.13 (A) a 900°C é possível perceber que a variação dos valores de retração linear foi desprezível para os corpos de prova preparados. Na temperatura de queima a 1000°C observa-se que a retração linear é mais significativa para os corpos de prova L10 do que para os M10L10 que, por sua vez, é mais significativa para os M5L5. Com o aumento da temperatura, a retração linear aumentou para todas as composições e, a 1100°C, os corpos de prova L10 têm maiores valores de retração linear que os M5L5 e os M10L10, estando em patamar superior daqueles preparados com a argila pura.

A absorção de água diminui com o aumento da temperatura para todas as composições, como mostra o gráfico da Figura IV.13 (B). Apesar da pequena variação da retração linear a 900°C, a absorção de água, nessas condições, aumenta à medida que ocorre um aumento no percentual de lodo (L10) e microesfera (M5L5 e M10L10) adicionados.

O comportamento do L10 pode ser explicado pela fusão do Sulfato de Alumínio Ferroso utilizado como floculante nas ETA's, uma vez que apresenta ponto de fusão em torno de 770°C. Já o comportamento de M5L5 e M10L10 pode estar relacionado à presença de microesferas de vidro, uma vez que, nesta temperatura, além de não ter início o processo de vitrificação decorrente da presença de quartzo, impede que os grãos de argila se aglutinem, o que contribui para o aumento do percentual de absorção de água observado.

Pelos difratogramas das matérias-primas utilizadas na confecção dos corpos de prova (Figuras 3.1, 3.2 e 3.3), pode-se verificar que a argila é composta por

quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), as microesferas de vidro por quartzo (SiO_2) e o lodo por quartzo, caulinita e outros compostos. A mudança de temperatura (900°C, 1000°C e 1100°C) proporciona transformações nas fases cristalinas desses materiais. Um exemplo deste tipo de transformação ocorre com a sílica: há pelo menos seis formas alotrópicas, podendo ainda ocorrer a dissolução de seus grãos, formando uma fase vítrea (CALLISTER,2007). Na argila, à temperatura de 500°C, tem-se o início da transformação da caulinita em metacaulinita (amorfa), responsável pelo aumento da porosidade.

Na temperatura de 1100 °C, a variação da absorção de água entre as composições L10, M5L5 e M10L10 encontram-se praticamente no mesmo patamar. As massas cerâmicas preparadas com maior teor de argila apresentaram, além da mudança de fase da caulinita e do quartzo presente no resíduo, a mudança de fase da sílica proveniente das microesferas de vidro, provocando uma diminuição da porosidade de acordo com a Figura IV.14 (A).

Na temperatura de 1100 °C, verifica-se que houve menor absorção de água (8,75%) para a composição M5L5, enquanto os corpos de prova elaborados com 10% de lodo (L10) apresentam um valor de absorção de água de 9,67%, o que representa uma diferença de 9,5% entre as composições nesta temperatura. Portanto, a adição das microesferas de vidro levou a uma redução na absorção de água, o que deve estar associado a uma porosidade reduzida deste material.

Apesar do ensaio de retração linear para classificação cerâmica não ser um parâmetro normatizado pelas NBR's, é um importante parâmetro industrial. Quando a cerâmica apresenta-se porosa ela é caracterizada por baixa retração linear, na ordem de 3%, o semi-poroso é caracterizado por uma retração de 4-6% e o gresificado por uma retração linear de 8% (BORLINI,2002).

A fabricação de tijolos ecológicos não está amparada por nenhuma regulamentação específica quanto aos aspectos de resistência mecânica do produto.

Os fabricantes adotaram duas normas aplicadas à produção de cerâmica vermelha para apresentar ao mercado como garantias da qualidade dos produtos oferecidos. A primeira trata da absorção, e a norma utilizada como referência é a NBR 7171/92 que é destinada para blocos cerâmicos para alvenaria. O índice de absorção médio é de 25%.

A segunda trata da resistência à compressão simples MPa (mega Pascal – unidade de medida), e que podem ser comparadas às recomendações apresentadas pelas normas NBR 7171/92 que sugere um valor médio superior a 2,0 MPa.

A partir dos parâmetros analisados, verifica-se que os corpos de prova produzidos em função do teor de lodo e das microesferas de vidro adicionados à argila apresentam uma baixa retração linear, podendo ser classificados como semi-porosos. O percentual de absorção de água encontrado classifica-os na faixa dos valores aplicados à produção de cerâmica vermelha.

➤ Porosidade Aparente e Densidade

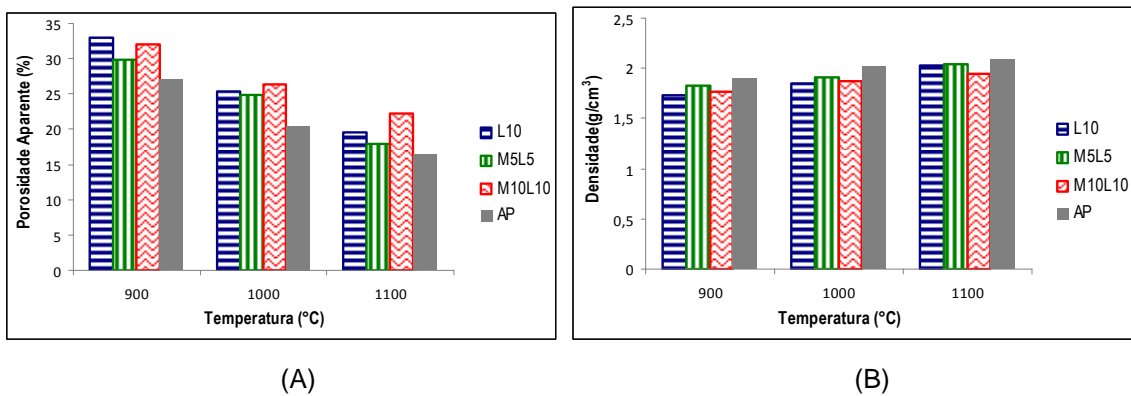


Figura IV.14 - Porosidade Aparente (A) e Densidade (B)

Observa-se que em todos os corpos de prova houve uma redução da porosidade aparente e aumento da densidade com o aumento da temperatura, isto porque em temperaturas mais elevadas ocorre o processo de vitrificação, decorrente da transformação do quartzo que preenche os poros do material conferindo o referido aumento da densidade.

➤ Tensão de Ruptura à Flexão

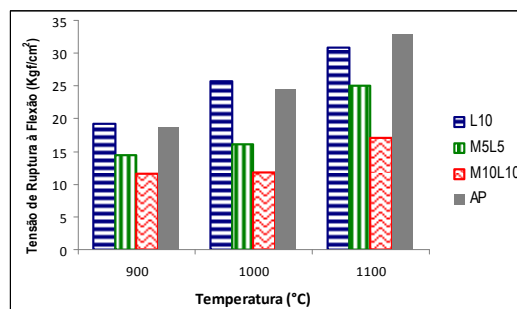


Figura IV.15 – Tensão de Ruptura à Flexão

Pode-se observar que as composições com lodo e microesferas são pouco afetadas pelo aumento da temperatura na faixa de 900°C a 1000°C, já a argila pura e L10 apresentam uma variação significativa nestas temperaturas. Observa-se um aumento na TRF para todas as composições à medida que a temperatura aumenta, sendo que as transformações mais significativas ocorrem a 1100°C.

Em todas as temperaturas, a composição com 10% de Lodo (L10) apresenta maior valor de TRF. Pode-se verificar, a partir do ensaio de resistência mecânica, que a argila pura (AP) apresenta comportamento semelhante quando comparada com os corpos de prova (CP) L10 nas três faixas de temperatura estudadas, mostrando que a adição de lodo neste percentual não interfere significativamente na resistência da peça cerâmica.

A adição de microesferas de vidro acarreta em diminuição da TRF, diferentemente do esperado. Quando comparamos a TRF entre as peças elaboradas, notamos que a adição de 5% microesferas de vidro com 5% de Lodo a massas cerâmicas compromete a resistência das peças e, com o aumento do teor de microesferas de vidro e lodo (M10L10), percebe-se uma queda ainda maior na resistência mecânica das peças quando comparada com as outras composições. Essa queda, entretanto, não é suficiente para retirar os CP do limite de aceitabilidade.

Na Tabela IV.4 estão os valores para os produtos cerâmicos estruturais segundo a ABNT 7170, de tijolo maciço cerâmico para alvenaria.

Tabela IV.4 – Classificação de tijolos maciços ABNT – NBR 7170

Classificação de tijolo maciço	Resistência mecânica a Flexão	
	Kgf/cm ²	MPa
Tijolo maciço	>15	> 1,5
Classe A	15 < 25	1,5 < 2,5
Classe B	25 < 40	2,5 < 4,0
Classe C	> 40	> 4,0

As amostras M5L5 podem ser classificadas como tijolo maciço classe A para a temperatura de queima de 1000°C e 1100°C. Já as amostras M10L10 somente na temperatura de queima de 1100°C segundo a NBR 7170, enquanto que AP e L10 são classificados como tijolo maciço classe B.

Os valores obtidos das análises físico-químicas realizadas classificam o material gerado M5L5 como próprio para uso na indústria cerâmica.

IV.4 -CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS MASSAS CERÂMICAS APÓS A QUEIMA

IV.4.1- Análise por difração de Raios X

Com base nos resultados da Figura IV.16, foi possível identificar uma série de transformações físico-químicas que ocorreram durante o processo de queima. Os resultados mostram que na composição L10 a 900 °C e 1000°C identificam-se picos característicos de quartzo. Com o aumento da temperatura para 1100°C, observa-se o aparecimento de picos característicos de mulita derivada da reorganização estrutural da metacaulinita.

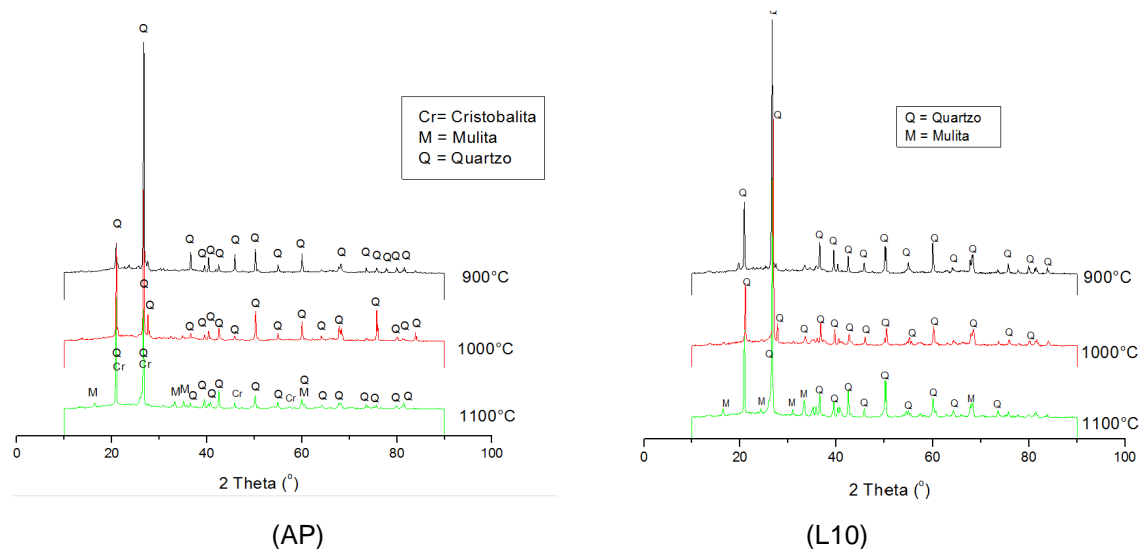
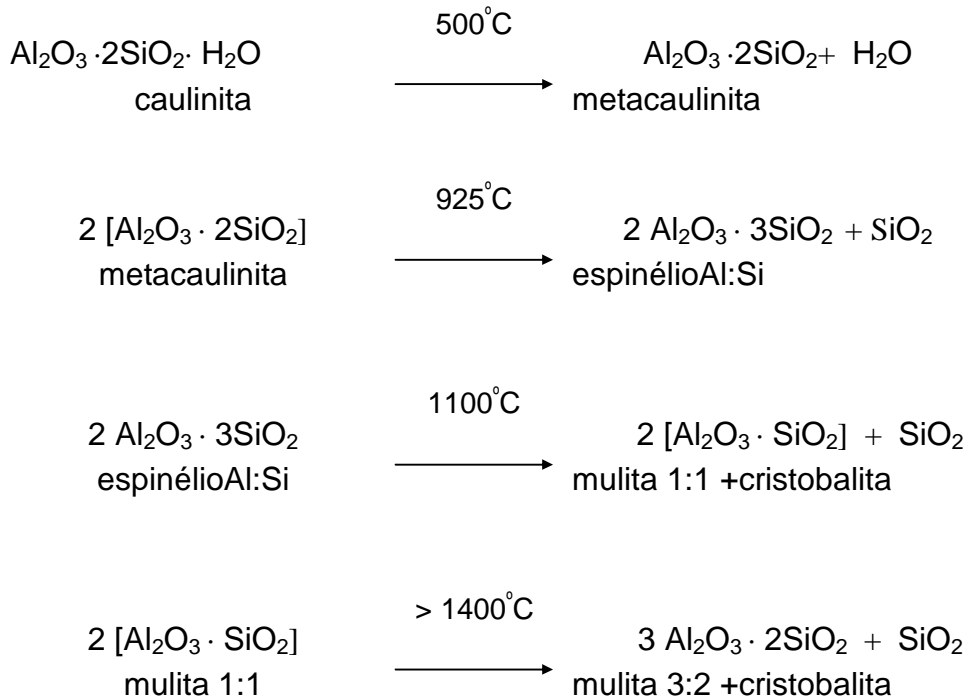


Figura. IV.16 – Difratoograma da argila pura (AP) e da composição (L10) em diferentes temperaturas de queima.

Na faixa de temperatura estudada observou-se o desaparecimento do pico da caulinita em relação ao difratograma da argila “*in natura*”, isso ocorre porque com o aumento da temperatura a caulinita sofre um processo de desidroxilação passando para metacaulinita, que é não cristalina.

As seqüências de reações de transformação da caulinita nesta faixa de temperatura são:



A caulinita observada no difratograma a 900°C sofre desidroxilação com o aumento da temperatura, formando metacaulinita (não cristalina). Segundo Souza Santos (1975), próximo de 950 °C inicia-se a formação de fases cristalinas que pode ocorrer de forma brusca, formando um tipo especial de alumina-gama (com estrutura cristalina semelhante a do espinélio $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Por volta de 1100 °C, esta fase se transforma em mulita e cristobalita, como observado no difratograma da Figura IV.16 (AP). Essa transformação começa a ocorrer acima de 1000 °C, de forma lenta, podendo não ser completa em pequenos tempos de patamar nesta temperatura.

Nesse caso, pode ter sido formada cristobalita numa forma metaestável. Acima de 1100 °C, além da formação de fases cristalinas (cristobalita bem-ordenada), também ocorre a formação de fase líquida, colaborando para o aumento da resistência do material (Figura IV.15). (TEIXEIRA, 2006)

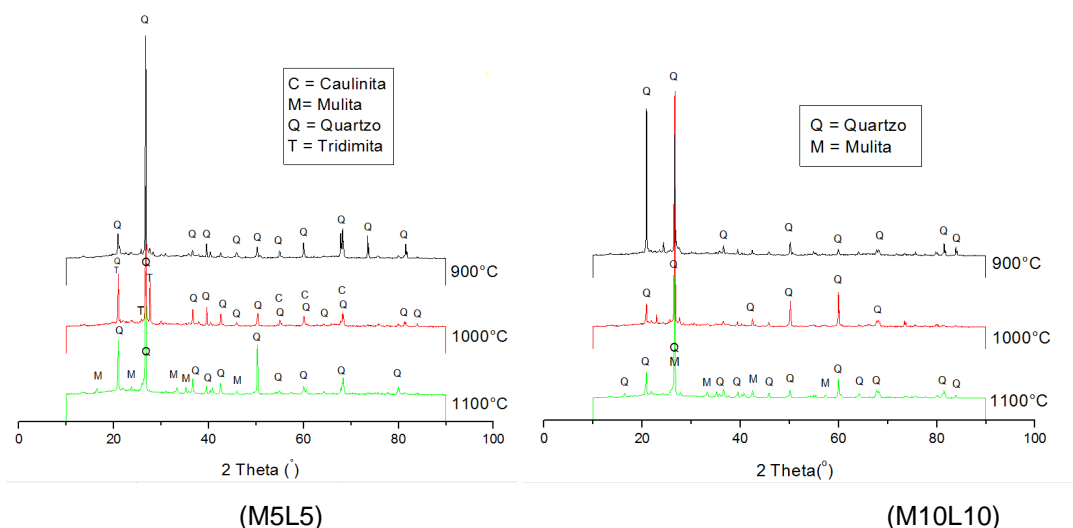


Figura IV.17 – Difratoograma da composição (M5L5) e da composição (M10L10) em diferentes temperaturas de queima.

Pela análise dos difratogramas para a composição M5L5 na Figura IV.17, identificou-se a presença predominante de Quartzo na temperatura de 900°C. Observa-se a presença de caulinita, quartzo e tridimita nas amostras que foram submetidas à temperatura de queima de 1000°C e à 1100°C, de quartzo e mulita.

Verifica-se na composição M10L10 a presença de quartzo nas temperaturas de queima de 900°C e 1000°C. Com o aumento da temperatura para 1100°C, observa-se o aparecimento da mulita.

O quartzo é encontrado na natureza sob formas polimórficas: quartzo, tridimita e cristobalita. Com a variação de temperatura, ocorrem as transformações de fases, recebendo cada uma sua denominação específica, o quartzo alfa, o mais comuns dos polimorfos, é estável a temperatura ambiente, transformando-se em beta a 573°C com ocorrência no aumento do volume em torno de 3% e a tridimita a 870°C (DEER, 1975).

Quando materiais à base de argilas são aquecidos a essa temperatura podem ocorrer algumas reações complexas. Uma dessas reações é a vitrificação, que consiste na formação gradual de um vidro líquido que flui para o interior e preenche parte do volume dos poros. O grau de vitrificação depende da temperatura e do tempo de queima, assim como da composição da massa cerâmica. Essa fase tende a escoar ao redor das partículas que permanecem sem fundir e preenchem os poros como resultado de forças de tensão superficial (ou

por ação capilar), uma contração também acompanha esse processo (CALLISTER, 2007).

Em uma massa cerâmica, o quartzo geralmente já está incorporado a outras substâncias, como as argilas. O quartzo desempenha um papel muito importante na cerâmica de revestimento, pois é um regulador da plasticidade da massa, facilita a etapa de secagem e a saída dos gases no processo de queima, garante a estabilidade das peças, ajusta a viscosidade da fase líquida formada durante a queima e o coeficiente de expansão térmica. A reatividade do quartzo com os demais óxidos presentes na massa é modesta, devido ao seu alto ponto de fusão, a sua granulometria geralmente grosseira e aos ciclos de queima rápidos aplicados nas indústrias atualmente. Em alta temperatura ocorre a dissolução de seus grãos formando uma fase vítrea (FERRARI, et al., 2000)

IV.4.2 - Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises microestruturais foram feitas com o objetivo de corroborar os resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos. O critério adotado para escolha da peça cerâmica a ser submetida ao MEV foi a avaliação de desempenho dessas propriedades.

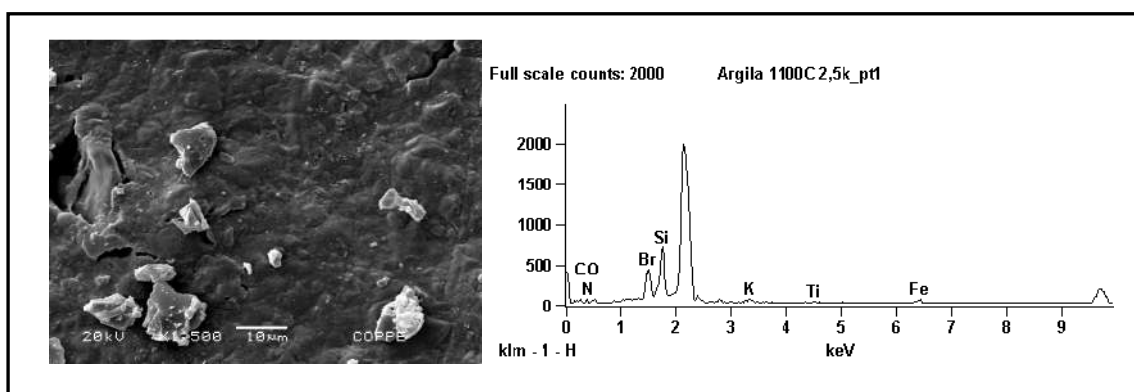


Figura IV.18 - Fotomicrografia do CP preparado com argila pura calcinada a 1100°C

A fotomicrografia da argila calcinada a 1100°C apresenta uma superfície densa, homogênea e pouco porosa. Essa baixa porosidade pode ser verificada através dos valores obtidos no ensaio de percentual de absorção de água no gráfico da Figura IV.13 (B).

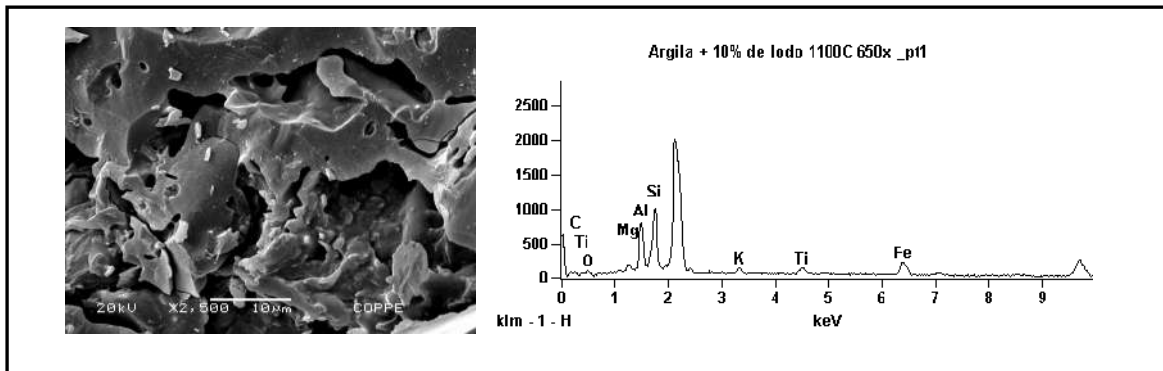


Figura IV.19 - Fotomicrografia da composição L10 calcinada a 1100°C e análise por EDS

As análises micro estruturais foram realizadas para composição L10, onde se verifica uma estrutura densa, heterogênea e porosa. A análise por EDS apresenta maiores teores de sílica e alumina.

O valor obtido na análise de perda ao fogo (28,95%) do lodo mostra que houve liberação de uma quantidade expressiva de massa, contribuindo para o aumento na porosidade, o que não ocorre quando comparado com a argila pura queimada a 1100°C. Esse aumento de porosidade ocorre não somente na superfície, mas também internamente, uma vez que se observa um acréscimo nos valores da porosidade aparente.

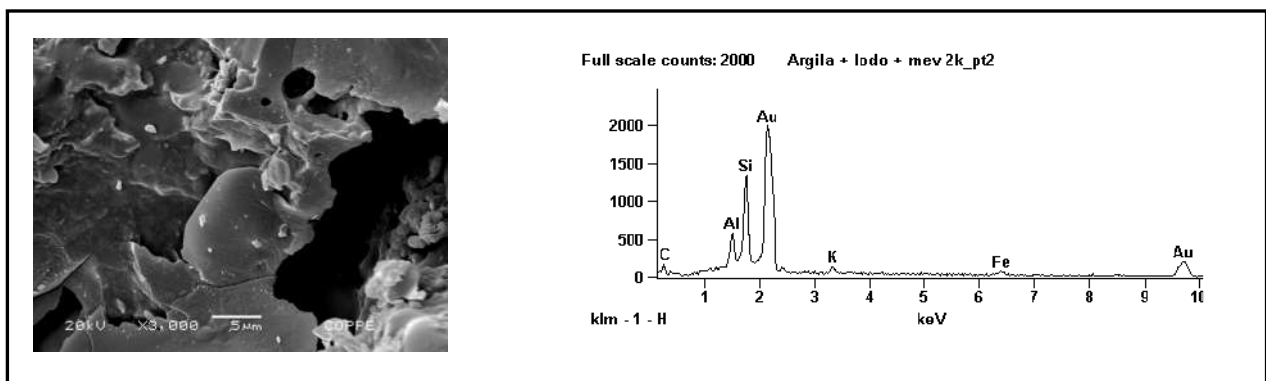


Figura IV.20 - Fotomicrografia da composição M5L5 e análise por EDS.

Na Figura IV.20 verifica-se que a fotomicrografia para composição M5L5 apresenta uma massa densa e área superficial porosa. Pela análise por EDS, verifica-se a presença majoritária de sílica e alumina.

Como observado na Figura IV.19 (A), a adição do lodo provoca um aumento na porosidade do material, e, a fim de reduzir esta porosidade, foram adicionados as microesferas de vidro. Entretanto, não se verificou, como o mostra o gráfico da Figura IV.20 (A), uma melhora nas propriedades mecânicas do material. Na Figura IV.20, a fotomicrografia mostra que as microesferas de vidro a 1100°C não se apresenta totalmente fundidas, não preenchendo os poros do material, o que justifica o resultado obtido.

V - CONCLUSÃO

1. As análises de caracterização do lodo evidenciam maiores teores de sílica e alumina, devido ao material sedimentado oriundo das águas e ao coagulante utilizado no tratamento. Sua fotomicrografia mostra um aspecto denso, homogêneo e pouco poroso.

2. Pelos resultados da difração de Raios X, a argila apresentou majoritariamente as fases cristalinas do quartzo e caulinita. Segundo a análise de microscopia eletrônica, observa-se um aspecto heterogêneo pouco poroso de natureza densa e formato irregular.

3. Por meio de ensaios físicos, mecânicos e químicos verificou-se que a incorporação dos lodos em matrizes cerâmicas, em geral, alteram as propriedades físicas e químicas do material levando a uma redução na qualidade das peças obtidas, quando comparado com a argila pura.

4. A análise dos ensaios físicos-mecânicos (retração linear, absorção de água, porosidade aparente, densidade e tensão de ruptura à flexão), para os corpos de prova calcinados, evidencia que a adição de 10% em peso de lodo de ETA é o máximo permitido, uma vez que teores acima desta faixa afetam as propriedades dos corpos cerâmicos, levando a efeitos significativos sobre a microestrutura dos corpos de prova.

5. As temperaturas de queima estudadas foram de 900°C, 1000°C e 1100°C. O aumento da temperatura de queima gerou uma diminuição no percentual de absorção de água, sobretudo na faixa de 1100°C influenciando na melhora dos resultados físicos-mecânicos das massas cerâmicas.

6. A análise da Tensão de ruptura à flexão para a argila pura e para a composição L10 atingem praticamente os mesmos valores de TRF em cada temperatura estudada, mostrando que a adição de até 10% de lodo à massa cerâmica não compromete a resistência dos corpos de prova em relação à argila pura.

7. Na comparação da composição L10 com M5L5 verificou-se que a adição de 5% microesferas de vidro com 5% de lodo à massas cerâmicas comprometem a resistência das peças e com o aumento do teor de microesferas de vidro e lodo (M10L10) percebe-se uma queda ainda maior na resistência mecânica das peças quando comparada com as outras composições. Portanto, a adição de microesferas de vidro acarreta em diminuição da TRF, diferentemente do esperado, entretanto, apesar da queda na TRF, os corpos de prova ainda encontram-se em valores aceitáveis.

8. A fotomicrografia da composição M5L5 mostra uma massa densa com área superficial porosa e que as microesferas de vidro a 1100°C não estão totalmente fundidas, não preenchendo os poros do material e promovendo um aumento esperado na resistência. Indicando a necessidade de se utilizar uma temperatura mais alta de queima para atingir o objetivo desejado.

9. Apesar da queda nos valores de TRF, estes ainda são considerados aceitáveis. Segundo a NBR 7170, AP e L10 são classificados como tijolo maciço classe B e M5L5 para a temperatura de queima de 1000°C e 1100° C são classificados como tijolo maciço classe A.

10. O lodo de ETA pode ser reaproveitado como matéria-prima na indústria cerâmica, na fabricação de cerâmica vermelha na proporção máxima de 10% em massa de lodo.

O reaproveitamento das microesferas de vidro como matéria-prima alternativa para incremento da tensão de ruptura à flexão das massas cerâmicas preparadas com lodo de ETA é viável desde que o teor não ultrapasse os 5% da massa de lodo de ETA presente na massa cerâmica.

Devido à natureza das microesferas de vidro, a temperatura de queima do corpo cerâmico deve ser mais elevada do que as usuais utilizadas na indústria de

cerâmica vermelha para que ocorra a fusão da sílica, acarretando o aumento de resistência da cerâmica.

A partir das observações apresentadas, conclui-se que apesar da composição química do lodo de ETA ser similar a de um argilomineral, segundo a análise de fluorescência de Raios X, este não se comporta como tal. Visto que a sua adição ao material argiloso provoca uma redução nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. É necessário, que novos estudos sejam realizados para verificar a interação do alumínio proveniente do coagulante utilizado no tratamento da água e a argila.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas as principais sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a temperatura máxima ideal para a fusão das microesferas de vidro;
- Avaliar o custo operacional do incremento da temperatura de queima e do processo como um todo;
- Avaliar a adição do lodo a outros tipos de resíduos;
- Verificar a qualidade do lodo com diferentes coagulantes utilizados;
- Avaliar a adição do lodo e de microesferas de vidro a outros tipos de resíduos; e
- Analisar a geração de gases no processo de queima.

VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7170**: Tijolos maciços de barro cozido para alvenaria - Ensaio de desempenho - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

_____ **NBR 7171**: Bloco cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

ACHON, C. L.; SOARES, L.V.; MEGDA, C. R. **Impactos ambientais provocados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água**. In.: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

ANDREOLI, C. V., **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. RiMa/ABES/PROSAB 2, Rio de Janeiro, 2001.

BIDONE, F.; SILVA A. P.; MARQUES, D.M. **Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos**, p.215-244. RiMa/ABES/PROSAB, Rio de Janeiro, 2001.

BORLINI, M.C. **Cerâmicas preparadas a partir de argila sedimentar com adição de cinzas da matéria orgânica do lixo e celulignina do processo de pré hidrólise de biomassas: propriedades mecânicas e inertização de metais pesados**. 2002. Dissertação de Mestrado - Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Química de Lorena, São Paulo.

BORGO, C.B.; **Minimização e reciclagem de lodo galvânico e poeira de jateamento**. 2005. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, 2005.

CALLISTER Jr, W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**, 7ª.ed., Rio de Janeiro, LTC, 2007.

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

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

DEER W. A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J.; **Minerais constituintes das rochas – Uma introdução**, 1ªed., Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975.

DI BERNARDO, L.; **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta.** In: Filtração direta aplicada a pequenas comunidades. Cap.1, p.1-15, RiMa/ABES/PROSAB. Rio de Janeiro, 2003.

DUTRA, R.P.S.; PONTES, L.R.A. **Obtenção e análise de cerâmicas porosa com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico.** Cerâmica, São Paulo. V.48 ,nº 308,p.223-230,2002

ECKENFELDER, J. W. W. **Industrial Water Pollution Control**, 2º ed., 1989. Mc GrawHill Series in Water Resources and Environmental Engineering, New York, USA.

FEITOSA, C. A. G.; CONSONI, A. J.; Análise de oportunidades de minimização da geração de lodo na estação de tratamento de água alto da boa vista, SP. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v.3, n.2, p.1-29, Seção Interfacehs 2, 2008.

FERRANTI, E. M.; **Desidratação de lodos de estação de tratamento de águas.** 2005. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FERRANTI, E. M.; GEHLING, G. R.; **Alternativa para desidratação de lodos de estação de tratamento de água (etas) em leitos de secagem – condicionamento químico com resíduo de cal.** In.: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

FERRARI, K. R.; FIGUEIREDO, P. M.; MACHADO, L. A.; PASCHOAL, J. O. A. Transformações das matérias primas do suporte durante a queima de revestimento cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v.53, 2000

FRANCO, J. M.; **Produção de blocos de concreto para pavimentação (BCP) utilizando resíduos de galvanoplastia.** 2011. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual de Maringá, Paraná.

GODINHO, K.O.; SILVA, A.G.P.; HOLANDA, J.N.F.; **Efeito da granulometria e da dispersão de adições de pó de vidro sobre as propriedades de corpos de cerâmica vermelha queimados.** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.

JANUÁRIO, G. F.; FERREIRA FILHO, S. S.; **Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo.** Eng. Sanitária e ambiental. Vol.12 - Nº 2, p. 117-126, 2007.

LUZ A.P.; RIBEIRO S. **Comportamento de queima de uma massa cerâmica contendo pó de vidro como fundente visando a obtenção de grês porcelanato.** In.: 48º Congresso Brasileiro e Encontro Anual de Cerâmica, 2004.

LUZ A. P.; RIBEIRO S.; Uso de pó de vidro como fundente para produção de grês porcelanato. **Revista Matéria**, v. 13, n. 1, p. 96 – 103, 2008.

MARGEM, J. I.; ALEXANDRE, J.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; **Cerâmica vermelha incorporada com lodo de ETA**. In.: 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.

MEGDA, C. R.; SOARES, L. V.; ACHIN, C. L.; **Propostas de aproveitamento de lodos gerados em ETAs**. In.: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

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

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F.; Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 50, p.324-330, 2004.

PAIXÃO L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v. 54, p.63-76, 2008.

PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; SALES, A.; BARON, O. **Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba / PR**. In. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL. Joinville, SC., 2003.

RAMOS, S. O.; MACEDO, R. S.; CARTAXO, M. J.; MENEZES, R.R.; NAVARRO, L. N. L. NEVES, G. A. Caracterização de argilas usadas para cerâmica estrutural. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.53, p.65-70, 2010.

REALI, M.A.P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. RiMa/ABES/PROSAB, Rio de Janeiro, 1999.

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

RICHTER, C. A. & NETTO, J. M. A., **Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada**. São Paulo: Editora Blücher, 2007.

Rodríguez, N. H.; Ramírez, S. M.; Varela, M.T.B.; Guillem, M.; Puig, J.; Larrotcha, E.; Flores, J. Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research**. v. 40, p. 778–786, 2010.

SALES, A; CORDEIRO, J. S. Imobilização da Fase Sólida de Lodo de Estações

de Tratamento de Água. In: ANDREOLI, C.V. Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. RiMa/ABES/PROSAB, Rio de Janeiro, 2001.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de argilas**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher LTDA, 1989.

SANTOS, I.S.S., RAMIRES, M. V. V., KAZMIERCZAK, C. S., SILVA, H. C., KERN, A. P., CAMARGO, S. A. **Caracterização e Identificação do Resíduo: Lodo da Estação de Tratamento do Município de São Leopoldo**, In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, 2000.

SABBAG, M. G; MORITA, D. M. **Incorporação de Lodo de Estações de Tratamento de Água Em Blocos Cerâmicos**. 2003. Disponível em: [http://www.bayer.com.br/byee/home.nsf/04bbd938b0f97149c1256ac500564711/83256e850068df8283256f2e003d38c8/\\$FILE/projeto%20Mauricio%20Sabbag.pdf](http://www.bayer.com.br/byee/home.nsf/04bbd938b0f97149c1256ac500564711/83256e850068df8283256f2e003d38c8/$FILE/projeto%20Mauricio%20Sabbag.pdf). Acesso em 18/07/2010.

SABOGAL-PAZ & DI BERNARDO. **Aspectos conceituais relativos à seleção das tecnologias de tratamento e disposição dos resíduos gerados na estação de tratamento de água**. In.: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

SOARES, A. F. S.; MACHADO A. O. V.; CUNHA A. B. L.; LAGES, F. A. E. **Orientações básicas acerca do impacto do lodo gerado nas ETAs, alternativas de tratamento/disposição e legislação correlata**. Ministério Público do Estado de Minas Gerais. CEAT/MA, 2009.

SOUZA, V. P.; TOLEDO, R.; HOLANDA, J. N. F.; VARGAS, H.; FARIA JR., R. T. Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água. **Cerâmica**. v.54, p. 351-355, 2008.

TAVARES, R. S.; ARAÚJO, A. P. M.; PRAGANA, R. B.; SOUZA, S. M. Q.; ARRUDA, V. C. M. **Características físico-químicas dos resíduos das estações de tratamento de água do litoral sul do estado de Pernambuco e da região metropolitana do Recife**. In.: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2009.

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

TOLEDO, E. B. S. **Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento (micro esferas de vidro) para produzir cerâmica vermelha**. 2006. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Paraná, PR.

TSUTIYA, M. T. & HIRATA, A. **Aproveitamento e disposição final de lodo das estações de tratamento de água do Estado de São Paulo.** In.: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

WENDHAUSEN P. A. P. **Apostila de caracterização de Materiais III.** UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2004.