

**AVALIAÇÃO DO LODO AMARELO DE ETA PARA INCORPORAÇÃO  
EM CERÂMICA VERMELHA**

**CAROLINA NASCIMENTO DE OLIVEIRA CAMARGO**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY  
RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

**SETEMBRO - 2014**

**AVALIAÇÃO DO LODO AMARELO DE ETA PARA INCORPORAÇÃO  
EM CERÂMICA VERMELHA**

**CAROLINA NASCIMENTO DE OLIVEIRA CAMARGO**

“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais”.

Orientador: Carlos Maurício Fontes Vieira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
SETEMBRO - 2014

# AVALIAÇÃO DO LODO AMARELO DE ETA PARA INCORPORAÇÃO EM CERÂMICA VERMELHA

**CAROLINA NASCIMENTO DE OLIVEIRA CAMARGO**

“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais”.

Aprovada em 24 de setembro de 2014.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (PhD. Engenharia Mecânica) - UENF

---

Prof. Jonas Alexandre (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

---

Prof<sup>a</sup>. Regina Maria Pinheiro (D.Sc., Eng. e Ciência dos Materiais) - IFF

---

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira (D.Sc., Eng. e Ciência dos Materiais) – UENF  
Orientador

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais Jocely e Nylcimar, ao meu irmão  
Marcus Vinícius e meu marido Jefferson.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, fonte da minha inspiração e alegria.

Aos meus pais, Jocely, Nylcimar e meu irmão Marcus Vinícius por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos, sempre com muita dedicação e amor. Á vocês meu eterno carinho e gratidão!

Ao meu marido Jefferson, por toda ajuda, confiança e amor.

Ao Prof. Carlos Maurício pela orientação e oportunidade de realizar este trabalho.

A Cerâmica Sardinha e a Empresa CSN-Volta Redonda, RJ pelo fornecimento das matérias-primas utilizadas neste trabalho.

Ao professor Fernando Vernilli da USP, pelo fornecimento de informações, materiais e bibliografias.

Aos professores Gustavo Xavier, Jonas Alexandre por suas valiosas sugestões.

Aos professores Eduardo Atem, Jonas Alexandre e Regina Maria Pinheiro por aceitarem em fazer parte da banca de avaliação deste trabalho.

A todos os professores que passaram pela minha formação e dividiram seus conhecimentos comigo.

A FAPERJ e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos Millena Maria, Isa Maria e Amado pelo apoio e carinho.

A minha amiga e professora Rosa Maria Volpini pela ajuda com a tradução.

Ao meu amigo Rômulo por sempre me ajudar nas etapas deste trabalho.

Aos meus amigos do prédio, Valério, Marlúcia, Geovana, Sheila, Alcides e Vitória.

Aos secretários, técnicos do LAMAV, LECIV e demais colegas: Elaine, Shirlene, Milton, Vanússia, Zulmira, Everton Maick, Silvio, Jadson, Rosane, Michel Picanço, Michelle Babisk pela ajuda na realização deste trabalho.

A todos que me ajudaram direta e indiretamente no desenvolvimento desse trabalho.

**Muito Obrigada.**

## Sumário

Lista de Figuras.....	Viii
Lista de Tabelas.....	X
Resumo.....	xi
Abstract.....	Xii
Capítulo 1. Introdução.....	1
Capítulo 2. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo Geral.....	3
2.2. Justificativas.....	3
Capítulo 3. Revisão Bibliográfica.....	4
3.1. Tratamento de água.....	4
3.1.1. Processo de Tratamento de água.....	4
3.1.1.1. Coagulação.....	6
3.1.1.2. Floculação.....	6
3.1.1.3. Decantação.....	7
3.1.1.4. Filtração.....	8
3.1.1.5. Desinfecção.....	9
3.1.1.6. Fluoretação.....	10
3.1.1.7. Correção de acidez.....	10
3.2. Resíduos.....	10
3.2.1. Resíduos sólidos.....	11
3.2.2. Incorporação de resíduos sólidos em cerâmica vermelha.....	14
3.3. Cerâmica.....	17
3.3.1. Cerâmica Vermelha.....	20
3.3.2. Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes.....	22
3.3.3. Características das argilas de Campos dos Goytacazes.....	22
3.4. Lodo de ETA.....	23
3.4.1. Resíduos gerados no tratamento de água.....	24
3.4.2. Características do lodo de ETA.....	26
3.4.3. Composição química do lodo de ETA e ensaios de lixiviação e solubilização.....	26
3.4.4. Situação mundial do lodo de ETA.....	32
3.4.5. Pesquisas realizadas com lodo de ETA em cerâmica vermelha.....	36
Capítulo 4. Materiais e Métodos.....	46
4.1. Materiais.....	47
4.2. Métodos.....	52
4.2.1. Caracterização das matérias primas.....	52
4.2.1.1. Caracterização mineralógica.....	53
4.2.1.2. Caracterização química.....	53

4.2.1.3. Caracterização física.....	53
4.2.2. Preparação das massas cerâmicas e dos corpos de prova.....	54
4.2.3. Ensaio Físicos e mecânicos dos corpos de prova.....	55
4.2.3.1. Método de Pfefferkorn.....	55
4.2.3.2. Densidade Aparente.....	57
4.2.3.3. Retração linear.....	57
4.2.3.4. Tensão de ruptura à flexão.....	57
4.2.3.5. Absorção de água.....	58
4.2.4. Avaliação microestrutural.....	58
Capítulo 5. Resultados e Discussões.....	59
5.1. Caracterizações das matérias primas.....	59
5.1.1. Caracterização mineralógica.....	59
5.1.2. Caracterização química.....	62
5.1.3. Caracterização física.....	63
5.2. Propriedades físicas e mecânicas.....	67
5.2.1. Plasticidade Pfefferkorn.....	67
5.2.2. Densidade aparente.....	68
5.2.3. Retração linear.....	69
5.2.4. Tensão de ruptura à flexão.....	70
5.2.5. Absorção de água.....	71
5.3. Avaliação Microestrutural.....	73
Capítulo 6. Conclusões.....	78
Capítulo 7. Sugestões para trabalhos futuros.....	80
Capítulo 8. Referências Bibliográficas.....	81

## Lista de Figuras

3.1. O Tratamento da água .....	5
3.2. Unidades básicas de organização de um floco de coagulação-floculação.....	7
3.3. Etapa de floculação.....	7
3.4. Decantadores.....	8
3.5. Filtros.....	9
3.6. Caracterização e classificação de resíduos sólidos.....	13
3.7. Ilustração de uma ETA convencional e locais de geração dos resíduos.....	24
3.8. Resíduos de ETAs.....	25
3.9. Resíduos de ETAs (Água de lavagem dos filtros).....	25
3.10. Disposição do lodo das ETA's nos EUA.....	32
3.11. Disposição do lodo das ETA's no Reino Unido.....	33
3.12. Disposição do lodo das ETA's na França.....	34
3.13. Disposição do lodo das ETA's no Japão em 2005.....	34
4.1. Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental.....	46
4.2. Captação de água do Rio Paraíba do Sul.....	47
4.3. Canal de captação.....	48
4.4. Sistema primário de peneiramento de particulados em suspensão na água bruta.....	48
4.5. Detalhe da peneira.....	49
4.6. Bacia de decantação para separação de argila e areia.....	49
4.7. Estação de floculação e tanques de filtração.....	50
4.8. Etapa de floculação.....	50
4.9. Saída de água clarificada.....	51
4.10. Estação de centrifugação da lama floculada.....	51
4.11. Saída da lama centrifugada.....	52
4.12. Massa cerâmica argilosa.....	52
4.13. Lodo amarelo de ETA.....	52
4.14. Corpos de prova queimados a 600, 800 e 1000°C das cerâmicas com 0, 2,5, 5, 7,5 e 10% de lodo amarelo de ETA.....	55
5.1. Difratoograma de raios X do lodo amarelo de ETA.....	59
5.2. Difratoograma de raios X da argila.....	61
5.3. Curvas ATG/DTA do lodo amarelo de ETA.....	62
5.4. Análise granulométrica do lodo amarelo de ETA e da massa cerâmica.....	65
5.5. Diagrama de Winkler com a localização das matérias primas.....	66
5.6. Determinação do índice de plasticidade de Pfefferkorn da composição 0%.	67
5.7. Determinação do índice de plasticidade de Pfefferkorn da composição 10%.....	68
5.8. Densidade aparente a seco das composições.....	69

5.9. Retração linear de queima das cerâmicas.....	70
5.10. Tensão de ruptura à flexão das cerâmicas.....	71
5.11. Absorção de água das cerâmicas.....	72
5.12. Micrografias de Microscopia Ótica (MO) das cerâmicas com 0% de lodo amarelo de ETA queimada a 1000°C.....	73
5.13. Micrografias de Microscopia Ótica (MO) das cerâmicas com 10% de lodo amarelo de ETA queimada a 1000°C.....	74
5.14. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a 1000°C com 0% de lodo amarelo de ETA.....	75
5.15. Espectros de EDS correspondentes aos pontos 1, 2, 3 e 4 do (MEV) a 1000°C com 0% de lodo amarelo de ETA.....	76
5.16. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a 1000°C com 10% de lodo amarelo de ETA.....	77
5.17. Espectros de EDS correspondentes aos pontos 1, 2, 3 e 4 do (MEV) a 1000°C com 10% de lodo amarelo de ETA.....	77

## Lista de Tabelas

3.1. Tratamento requerido para as águas destinadas ao abastecimento público..	4
3.2. Indicadores de referência e os fatores que influenciam na eficiência do tratamento.....	5
3.3. Composição química dos lodos de ETA`s (% em peso) já caracterizados.....	27
3.4. Concentração de metais do lixiviado do lodo de PAC.....	28
3.5. Concentração de metais do lixiviado do lodo de Moringa.....	29
3.6. Concentração de metais do solubilizado do lodo de PAC.....	30
3.7. Concentração de metais do solubilizado do lodo de Moringa.....	31
4.1. Composição das formulações estudadas.....	54
5.1. Composição química das matérias primas estudadas (% em peso).....	63
5.2. Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha.....	66

Resumo da dissertação apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

## **AVALIAÇÃO DO LODO AMARELO DE ETA PARA INCORPORAÇÃO EM CERÂMICA VERMELHA**

**CAROLINA NASCIMENTO DE OLIVEIRA CAMARGO**

**24 de Setembro de 2014**

**Orientador: Carlos Maurício Fontes**

O resíduo denominado lodo amarelo de ETA (Estação de Tratamento de Água) é gerado no processo de decantação. O material estudado é oriundo da Companhia Siderúrgica Nacional (ETA-CSN), no qual é responsável por 80% do abastecimento de água da cidade de Volta Redonda-RJ. Uma vez que o lodo normalmente é visto como uma problemática, o objetivo do presente trabalho foi caracterizá-lo e investigar a sua adição em cerâmica vermelha. O resíduo foi caracterizado através de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), peneiramento e sedimentação, análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG). As formulações foram preparadas com adições em 0, 2,5, 5, 7,5 e 10% em peso do lodo em massa argilosa proveniente do município de Campos dos Goytacazes - RJ e foram queimadas nas temperaturas de 600, 800 e 1000°C. Foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas por retração linear, absorção de água e tensão de ruptura à flexão. A microestrutura dos corpos de prova queimados foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia ótica (MO). Verificou-se que o lodo amarelo de ETA apresentou composição química e mineralógica similar com as argilas, no entanto a incorporação do lodo aumentou a absorção de água e diminuiu a resistência mecânica após a fase de queima da cerâmica, portanto sua utilização não deve exceder 2,5% na incorporação em cerâmica vermelha.

**Palavras-chave:** Lodo Amarelo, cerâmica vermelha, estação de tratamento de água, adição de resíduo.

Abstract of dissertation presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the Master Degree in Materials Engineering and Science.

## **EVALUATION OF SLUDGE YELLOW WTP FOR INCORPORATION IN RED POTTERY**

**CAROLINA NASCIMENTO DE OLIVEIRA CAMARGO**

**September 24<sup>th</sup>, 2014**

**Supervisor: Carlos Maurício Fontes Vieira**

The yellow residue called sludge WTP (Water Treatment Plant) is generated in the settling process in the Water Treatment Plant. The material studied comes from the (ETA-CSN) National Steel Company - Companhia Siderúrgica Nacional, which is responsible for 80% of the water supply of the city of Volta Redonda-RJ. Once the sludge is usually seen as a problem, the objective of this work is to characterize it and investigate its addition in red ceramic. The residue was characterized by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), sieving and sedimentation, differential thermal analysis and thermogravimetry (DTA/TG). The formulations were prepared with additions at 0, 2.5, 5, 7.5 and 10wt% clay in the sludge mass from the municipality Campos of Goytacazes - RJ and were burned at temperatures of 600, 800 and 1000°C. We have determined the physical and mechanical properties of linear shrinkage, water absorption and flexural strength. The microstructure of burned bodies of evidence was evaluated by scanning optical microscopy (OM) electron microscopy (EM). It was found that the yellow sludge of WTP clays showed a similar chemical and mineralogical composition, however the incorporation of the sludge increased water absorption and reduced mechanical strength after firing the ceramic phase, therefore their use should not exceed 2,5% in the incorporation in red ceramic.

**Keywords:** Sludge Yellow, Red ceramics, water treatment plant, residue addition.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural fundamental às diversas formas de utilização pelo homem, sendo indispensável para a sua sobrevivência. Embora grande parte do nosso planeta seja coberta por água, somente uma pequena parte é utilizada pelo homem, pois os mares constituem 97,2% desse total e existem águas não aproveitáveis como a neve e geleiras, o que se torna não acessível e inviável.

A quantidade de água livre sobre a Terra atinge 1370 milhões de km<sup>3</sup>. Onde, apenas 0,6% de água doce líquida se torna disponível, naturalmente, correspondendo a 82 milhões de km<sup>3</sup>. Desse valor, somente 1,2% se apresenta sob forma de rios e lagos, sendo o restante (98,8%) constituído de água subterrânea, da qual somente a metade é utilizável, uma vez que a outra parte está situada abaixo de uma profundidade de 800 m, inviável para captação pelo homem. Assim, restam aproveitáveis 98.400 km<sup>3</sup> nos rios e lagos e 4.050.800 km<sup>3</sup> nos mananciais subterrâneos, o que corresponde cerca de 0,3% do total de água livre do planeta. (MOTA, 2006).

Para a água coletada nos mananciais ser potável é necessário remover impurezas coloidais e em suspensão existentes na forma de materiais inertes como a areia e outros solos, pedaços de vegetais, organismos vivos e partículas dissolvidas desses materiais, responsáveis pela cor e turbidez da água. Este processo é realizado em Estações de Tratamento de Água – ETA. A indústria da água de abastecimento residencial e para indústrias é a mesma, até exato ponto, quando se utiliza o tratamento convencional (coagulação, floculação, decantação e filtração), transformando a água inadequada para o consumo humano e/ou industrial, em produto especificado para esses fins. Para tal finalidade são usados diversos processos e produtos químicos que ao reagirem com alguns constituintes da água nos equipamentos usados na clarificação (floculadores, decantadores e filtros). No tratamento da água, há geração de resíduos como o lodo gerado na decantação.

Os lodos de ETA são classificados como resíduos sólidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), onde seu lançamento in natura no meio ambiente é vedado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, disposta pela Lei nº 12305 (BRASIL, 2010).

Isto significa que pelo menos um dos seus constituintes apresentam se limitrofes acima do indicado pela norma da ABNT de solubilização (ABNT NBR

10006 - 2004), conseqüentemente, não podem ser lançados nos cursos d'água sem devido tratamento, já que esta prática é considerada crime ambiental, por causar efeitos diretos ao ambiente aquático do corpo receptor, provocando danos à fauna aquática.

Assim, se torna necessário o estudo da disposição final adequada do mesmo a fim de contribuir para diminuir impactos ambientais.

Com a grande preocupação da disposição final deste lodo, vem sendo realizado diversos estudos com vistas a identificar e desenvolver alternativas de minimização, tratamento e disposição dos resíduos sólidos gerados, como por exemplo, o uso na construção civil, em cimento e em cerâmica vermelha (HOPPEN, *et al.*, 2005).

A indústria cerâmica vem incorporando vários resíduos industriais em seu processo, podendo citar os resíduos de mineração, da indústria do papel e celulose, metalúrgica entre outras. As massas origem utilizadas na indústria de cerâmica tradicional são de natureza heterogênea, geralmente constituída de materiais plásticos e não plásticos, com um vasto espectro de composições, motivo pelo qual permitem a presença de materiais residuais de vários tipos, mesmo em porcentagens significantes (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como finalidade estudar os efeitos da incorporação do lodo proveniente da etapa de clarificação de água de uma indústria siderúrgica nas argilas de Campos de Goytacazes - RJ.

Com a expectativa de aumentar a diversidade da oferta de matérias primas alternativas ao setor cerâmico, todavia, diminuindo extração da principal matéria prima (argila) e tornando o processo mais sustentável, a pesquisa pode contribuir ainda para atenuar os impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada do lodo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Avaliar o potencial de incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água na composição de massa cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Determinar as características físicas, químicas, mineralógicas das matérias-primas investigadas e avaliar sua microestrutura;
- Identificar a quantidade ideal do lodo a ser incorporada em função do efeito na plasticidade da massa e propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas queimadas.

### **2.2. Justificativas**

- A incorporação do resíduo de estação de tratamento de água (lodo amarelo de ETA) na cerâmica de Campos dos Goytacazes podendo resultar em ganhos, tanto de natureza ambiental, auxiliando na preservação do meio ambiente, possibilitando assim um destino ambientalmente correto para esse resíduo com problemas de destinação, como também econômicos, para os fornecedores de resíduos e para a indústria cerâmica consumidora.
- A possibilidade de ajuste da trabalhabilidade e plasticidade das argilas de Campos dos Goytacazes.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Tratamento de água

O tratamento de água é realizado com o objetivo de melhorar sua qualidade para o abastecimento público, onde pode ser considerado como uma indústria, que por meio de processos e operações com introdução de produtos químicos, transforma água inadequada para o consumo humano em um produto que esteja de acordo com o padrão de potabilidade.

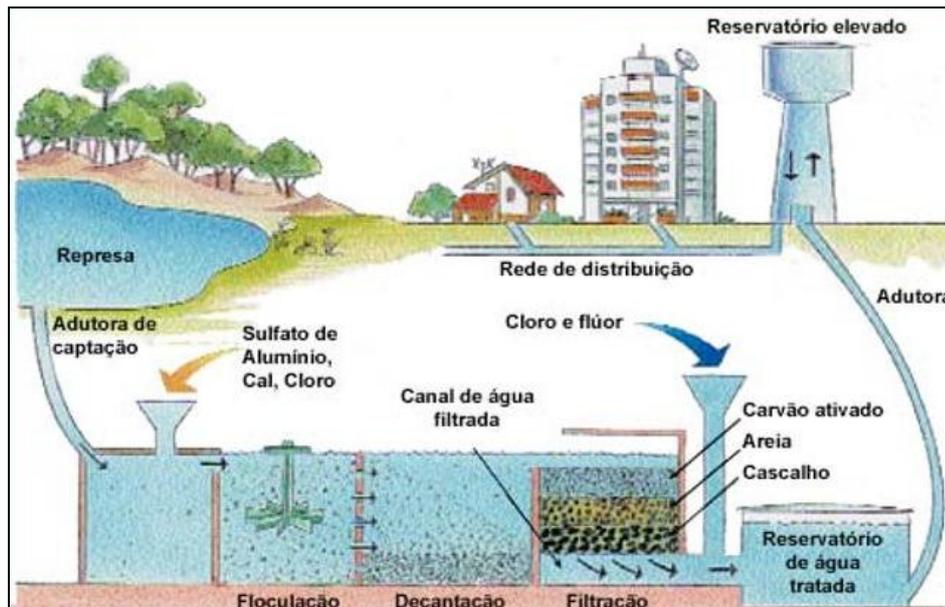
O Conselho Nacional de Meio Ambiente, por meio da Resolução nº 357 (BRASIL, 2005), classificou as águas doces, salobras e salinas no Brasil segundo seus usos, estabelecendo o tipo de tratamento necessário para as águas destinadas ao abastecimento público, conforme mostrado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** – Tratamento requerido para as águas destinadas ao abastecimento público. Fonte: BRASIL (2005).

<b>Classificação</b>	<b>Tratamento requerido</b>
Classe especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento simplificado
Classe 2	Tratamento convencional
Classe 3	Tratamento convencional
Classe 4	Águas destinadas a usos menos exigentes

##### 3.1.1. Processo de tratamento de água

No procedimento convencional de tratamento água aplica-se a sedimentação com uso de coagulantes e é compreendido pelas seguintes operações unitárias: coagulação, floculação, decantação, filtração para a clarificação da água, seguida da correção do pH, desinfecção e fluoretação (BOTERO, 2009). A Figura 3.1 mostra as etapas do tratamento de água e tabela 3.2 apresenta detalhes das operações unitárias citadas.



**Figura 3.1** – O Tratamento da água. Fonte: EDUCADORES (2014).

**Tabela 3.2** – Indicadores de referência e os fatores que influenciam na eficiência do tratamento. Fonte: HELLER e PÁDUA (2006); MACEDO (2007) *apud* FRANCISCO *et al.* (2011).

Processo	Objetivo	Etapa	Indicadores de referência	Fatores que influenciam a eficiência
<b>Clarificação</b>	Remoção de turbidez, cor e, de forma secundária, matéria orgânica natural.	Coagulação	Volume de coagulante e custos operacionais.	Concentração de matéria suspensa, coloidal e dissolvida, pH, temperatura, dosagem de coagulante e tempo de mistura rápida
		Floculação	Tamanho e densidade dos flocos, custos operacionais.	Eficiência da etapa anterior, quantidade de agitação, concentração de flocos
		Decantação	Turbidez, cor, sólidos dissolvidos e suspensos, quantidade de lodo decantado e velocidade de decantação, custos operacionais.	Eficiência das etapas anteriores, tamanho e densidades dos flocos, quantidade de agitação.
		Filtração	Turbidez, cor, sólidos suspensos e dissolvidos	Escolha do tipo de filtro, o tamanho do material a ser filtrado, o método de filtração escolhido
<b>Desinfecção</b>	Eliminação de microrganismos patogênicos	-	Número mais provável de coliformes, quantidade de desinfetante e outros produtos usados.	Tempo de contato com a água, tipo de agente químico, intensidade e natureza do agente físico utilizado como desinfetantes e tipos de organismos
<b>Fluoretação</b>	Combate e prevenção à cárie	-	Concentração de flúor	-
<b>Correção de acidez</b>	Combate a corrosão e incrustação nos encanamentos	-	Volume de cal hidratada ou carbonato de sódio	-

As águas superficiais, geralmente, contêm sólidos suspensos sedimentáveis e coloidais, oriundos da erosão do solo, decaimento da vegetação, micro-organismos e compostos produtores de cor. Materiais de tamanho maior, como a areia e silte, considerados os sólidos suspensos sedimentáveis, podem ser eliminados a um grau considerável pela (pré) decantação (anterior ao tratamento químico) simples, mas as partículas mais finas devem ser quimicamente coaguladas para produzirem flocos, os quais são removidos na decantação e filtração subsequentes. Esses processos constituem o que a indústria de tratamento de água denomina de clarificação (FILHO e RITA, 2011).

#### **3.1.1.1. Coagulação**

O processo de coagulação consiste nas reações das impurezas presentes na água com os compostos hidrolisados formados pela adição de agentes coagulantes. Ela corresponde a uma etapa indispensável à remoção satisfatória das partículas suspensas, coloidais, dissolvidas e outros contaminantes, responsáveis pela turbidez, cor, odor e sabor nas águas para abastecimento (HELLER e PÁDUA, 2006).

Macedo (2007) avalia que a coagulação é uma das etapas mais importantes que compõe as ETA's, havendo a necessidade de desestabilização química das partículas contidas nas águas brutas, para a posterior aglutinação e sedimentação nas unidades de floculação e coagulação, ao mesmo tempo.

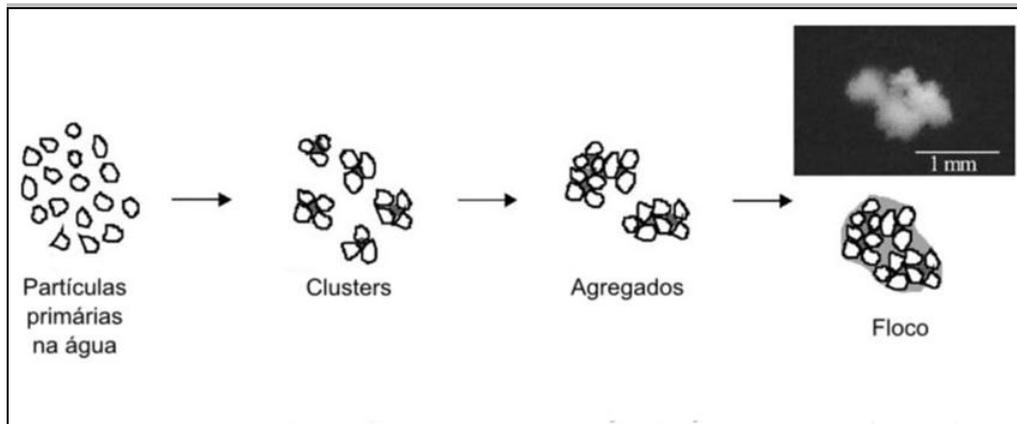
Segundo Heller e Pádua (2006), inúmeros são os fatores que influenciam na eficiência do processo de coagulação. Dentre eles, destacam-se:

- a) Dosagem do agente coagulante;
- b) Tempo e gradiente de velocidade de mistura rápida;
- c) Auxiliares de coagulação;
- d) pH do meio;
- e) Dispersão do agente na mistura rápida.

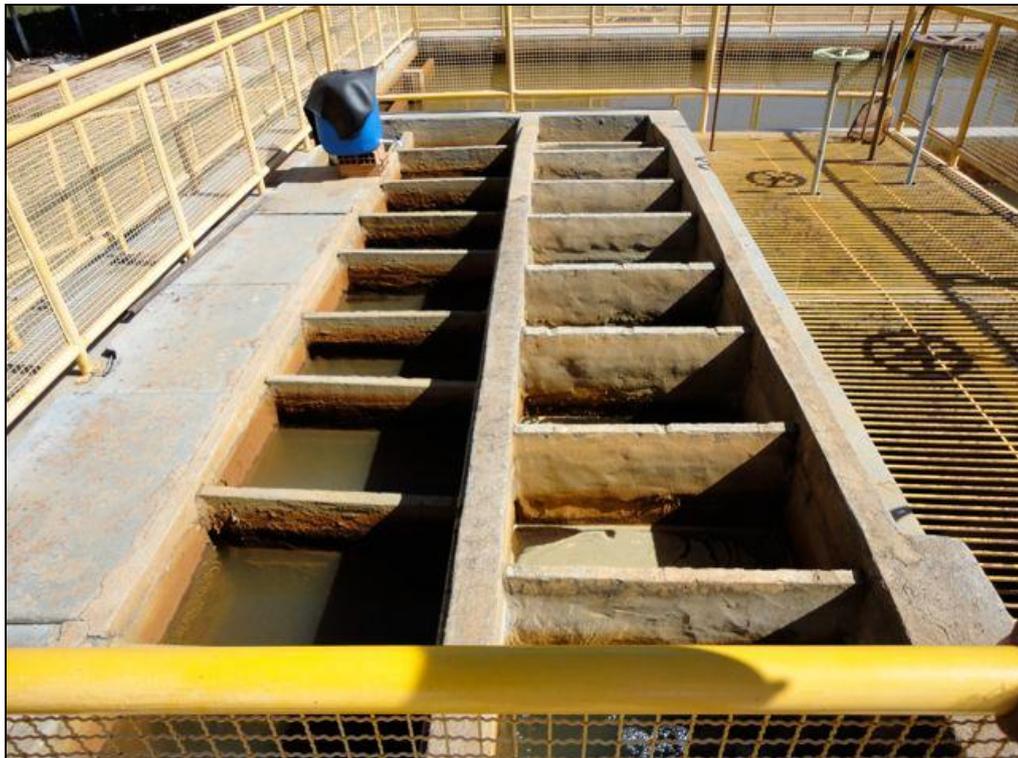
#### **3.1.1.2. Floculação**

A etapa de floculação tem a função de promover a aglomeração de partículas desestabilizadas de tamanho coloidal, de forma a induzir movimentos causados,

pelo gradiente de velocidade gerado e por floculador hidráulico ou mecânico, (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 2002), como demonstrado nas Figuras 3.2 e 3.3.



**Figura 3.2** – Unidades básicas de organização de um floculo de coagulação-floculação. Fonte: TURCHIULI; FARGUES (2004) *apud* KATAYAMA (2012).



**Figura 3.3** – Etapa de floculação. Fonte: ANGELIM (2008).

### 3.1.1.3. Decantação

Este é um fenômeno físico natural e corresponde a etapa de deposição das impurezas, aglutinadas em flocos no processo nas etapas anteriores (coagulação e floculação), devido a ação da força gravitacional (DI BERNARDO e COSTA, 1993 *apud* MACEDO, 2007).

Segundo HELLER E PÁDUA (2006) a implementação destas unidades é justificada em ETA's nas quais a água submetida ao tratamento apresenta concentrações de sólidos (dissolvidos, coloidais e/ou suspensos) elevadas, como etapa preliminar ao processo de filtração. O projeto destas unidades deve considerar a taxa de aplicação superficial, que está diretamente relacionada com a velocidade de sedimentação das partículas suspensas. A Figura 3.4 mostra uma unidade decantação.



**Figura 3.4** – Decantadores. Fonte: ANGELIM (2008).

#### **3.1.1.4. Filtração**

A filtração consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais presentes na água que escoam através de um meio poroso (Figura 3.5). Nas ETA's, a filtração é o processo final de remoção de impurezas, logo, principal responsável pela produção de água com qualidade condizendo com o padrão de potabilidade (OMS, 2004).

Para realizar a remoção de tais impurezas da água é necessário analisar o tipo de material que se deseja separar, como também, o tipo de filtro que será o mais adequado para tal processo. Deste modo, é possível verificar a velocidade com que

a água passa pelo mesmo e denominar qual filtro será mais apropriado: o filtro lento ou o filtro rápido (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 1991).



**Figura 3.5 – Filtros.** Fonte: ANGELIM (2008).

#### **3.1.1.5. Desinfecção**

SOUSA (2009) descreve que neste processo se usa um agente químico ou não químico que tem por objetivo a eliminação de microrganismos patogênicos presentes na água, incluindo bactérias, protozoários e vírus, além das algas, através da ocorrência de um ou mais dos seguintes mecanismos: a) destruição da estrutura celular; b) interferência na biossíntese e no crescimento celular, evitando a síntese de proteínas, ácidos nucleicos e co-enzimas. Dentre os agentes químicos utilizados na desinfecção, têm-se os oxidantes cloro, bromo, iodo, ozônio, permanganato de potássio e peróxido de hidrogênio.

Os processos de desinfecção têm como objetivo a destruição ou inativação de organismos patogênicos, capazes de produzir doenças, ou de outros organismos indesejáveis. Esses organismos podem sobreviver na água por várias semanas, em temperaturas próximas a 21°C e, em alguns casos, por vários meses, em baixas temperaturas (CUBILLOS, 1981).

Entre tantos agentes de desinfecção (desinfetantes) o mais empregado na purificação da água é o cloro pelos seguintes motivos: é facilmente disponível como gás, líquido ou sólido; é barato; é fácil aplicar devido à sua alta solubilidade; deixa um residual em solução, de concentração facilmente determinável que protege o sistema de distribuição; é capaz de destruir a maioria dos microrganismos patogênicos (SOUZA, 2009).

#### **3.1.1.6. Fluoretação**

O processo de fluoretação no Brasil está prevista na lei federal nº 6050 de 24 de maio de 1974, conta com o suporte de programas nacionais de financiamento e tem o apoio de gerações de sanitaristas envolvidas em sua defesa. (BLEICHER e FROTA, 2006).

A adição de compostos de flúor à água em tratamento tem como medida de saúde pública, visando à diminuição da incidência de cárie dentária. Dentre os produtos químicos utilizados para este fim, destacam-se o fluorsilicato de sódio e o ácido fluossilícico (DI BERNARDO *et al.* 2002).

#### **3.1.1.7. Correção de acidez**

Após passar por todos os processos de tratamento químico, a água fica agressiva e geralmente mais corrosiva, o que requer a correção do pH (com aplicação de cal hidratada, carbonato de sódio ou hidróxido de sódio) para neutralizar a acidez da água e proteger as tubulações contra a corrosão. O controle de corrosão ocorre com a alcalinização da água para remover o gás carbônico livre e para provocar a formação de uma película de carbonato na superfície interna das canalizações, que protege a tubulação contra incrustações (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 2002).

### **3.2. Resíduos**

Resíduos são as partes que sobram de processos derivados das atividades humanas e animal e de processos produtivos de origens industriais, domésticos, hospitalares, comerciais e agropecuários dentre outros, como a matéria orgânica, o lixo doméstico, os efluentes industriais e os gases liberados destes processos ou por

motores. Quanto ao estado físico os resíduos podem ser líquidos, sólidos ou gasosos e terem níveis de periculosidade variados (SEBRAE, 2013).

### **3.2.1 Resíduos sólidos**

De acordo com a norma NBR 10004 de Resíduos Sólidos – Classificação, os resíduos sólidos são definidos como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004a).

Ainda de acordo com a norma a segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados.

A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem. Os resíduos sólidos são classificados em:

- Resíduos classe I – Perigosos;
- Resíduos classe II – Não perigosos;
  - Resíduos classe II A – Não inerte;
  - Resíduos classe II B – Inerte.

Os resíduos da classe I, considerados perigosos pela norma, são todos aqueles que apresentam periculosidade ou características como:

- Corrosividade: atacam materiais e organismos vivos devido a suas características ácidas ou básicas intensas;
- Reatividade: reagem com outras substâncias, podendo liberar calor e energia;
- Toxicidade: agem sobre os organismos vivos, causando danos a suas estruturas biomoleculares;

- Inflamabilidade: podem entrar em combustão facilmente ou até de forma espontânea;
- Patogenicidade: apresentam características biológicas infecciosas, contendo microorganismos ou suas toxinas.

Qualquer resíduo que apresente pelo menos uma das cinco características acima descritas será classificado como resíduo perigoso e deverá ser tratado ou disposto em obediência a condições especiais.

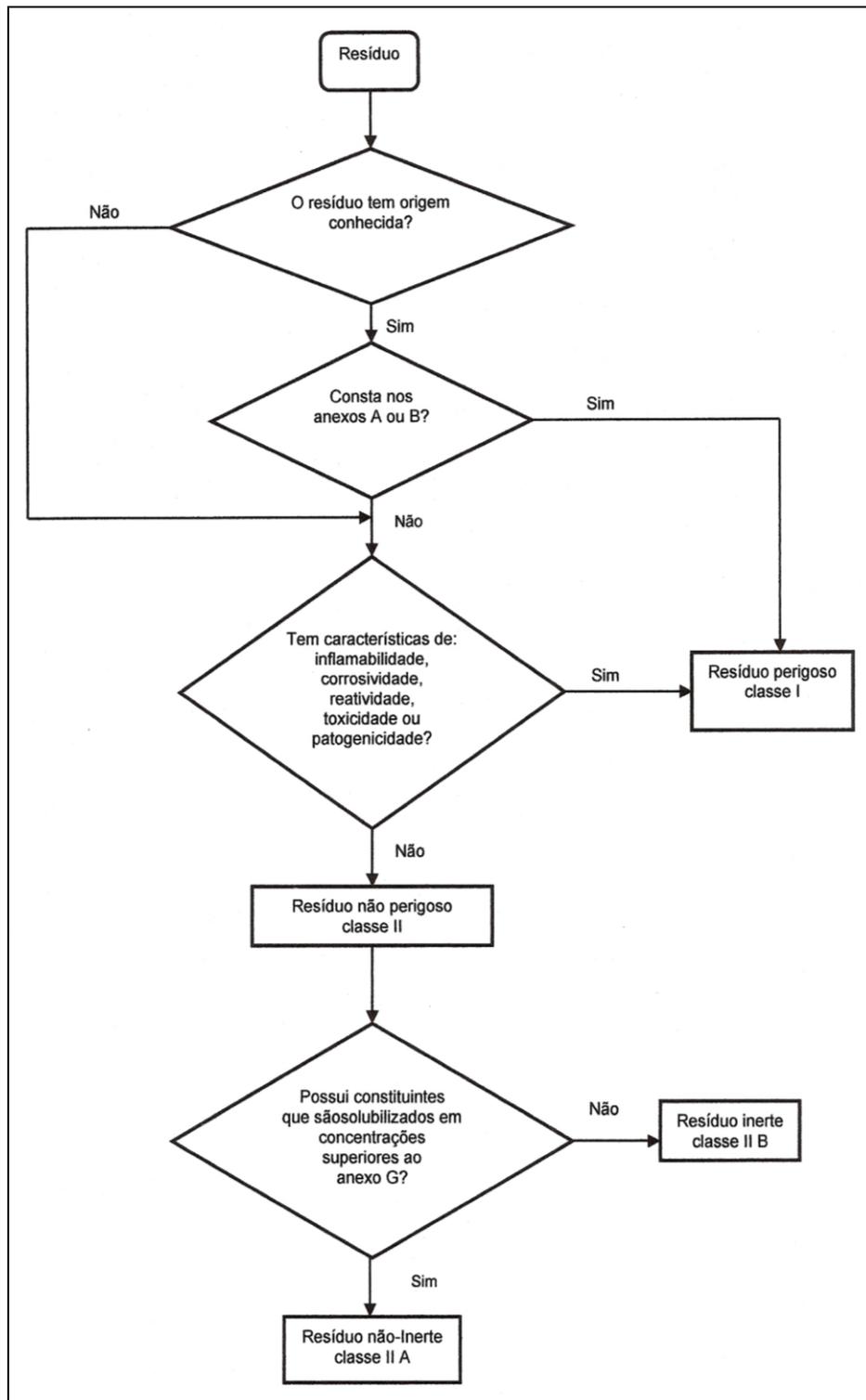
Segundo a NBR 10004/2004, alguns exemplos de resíduos classe II, são:

- Resíduo de restaurante (restos de comida);
- Resíduo de papel e papelão;
- Resíduo de madeira;
- Resíduo de borracha e plástico.

Os resíduos classe II A - Não Inertes, são definidos pela norma, como aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta norma. Os resíduos classe II A - Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Por sua vez, os resíduos classe II B – Inertes, são definidos como qualquer resíduo que, quando amostrado de forma representativa e, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizado a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, executando-se aspecto, cor, dureza e sabor.

A Figura 3.6 ilustra o fluxograma com o método de classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente de acordo com a NBR 10004 (2004a). Esta norma estabelece os critérios de classificação e os códigos para a identificação dos resíduos de acordo com suas características.



**Figura 3.6** – Caracterização e classificação de resíduos sólidos. Fonte: ABNT (2004a).

Todos os resíduos ou substâncias listados nos anexos A, B, D, E, F e H têm uma letra para codificação, seguida de três dígitos.

Os resíduos perigosos constantes no anexo A são codificados pela letra F e são originados de fontes não específicas. Os constantes no anexo B são codificados pela letra K e são originados de fontes específicas.

Os resíduos perigosos classificados pelas suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade são codificados conforme indicado a seguir:

- D001: qualifica o resíduo como inflamável;
- D002: qualifica o resíduo como corrosivo;
- D003: qualifica o resíduo como reativo;
- D004: qualifica o resíduo como patogênico.

Os códigos D005 a D052 constantes no anexo F identificam resíduos perigosos devido à sua toxicidade, conforme ensaio de lixiviação realizado de acordo com a norma NBR 10005 (ABNT, 2004b).

Os códigos identificados pelas letras P e U, constantes nos anexos D e E, respectivamente, são de substâncias que, dada a sua presença, conferem periculosidade aos resíduos e serão adotados para codificar os resíduos classificados como perigosos pela sua característica de toxicidade.

### **3.2.2. Incorporação de resíduos sólidos em cerâmica vermelha**

A indústria de cerâmica vermelha está entre as indústrias que mais reciclam resíduos industriais e urbanos; isto é devido a sua grande produção que facilita a incorporação de vários resíduos, além de suas propriedades físicas e mecânicas. O aproveitamento de resíduos industriais não é novidade e vem ocorrendo em vários países. Entre as principais razões que levam um país a reciclar seus resíduos está o esgotamento da matéria prima e o aumento do volume dos resíduos (SILVA, 2006).

A heterogeneidade da argila tradicional possibilita a incorporação de vários tipos de resíduos com um pequeno sacrifício nas propriedades do produto final. (SANTOS *et al.*, 2004).

Vários são os resíduos industriais absorvidos pela indústria cerâmica, podendo-se citar os resíduos de mineração, de vidro, da indústria de papel e celulose, da indústria metalúrgica, de saneamento e limpeza pública, energética, entre outros.

DONDI *et al.* (1997 a, b) ressaltam, que alguns tipos de resíduos podem melhorar o processamento e a qualidade da cerâmica. Devido à composição variada das massas argilosas e da sua plasticidade, é possível a incorporação de diversos tipos de resíduos com o objetivo de reduzir os resíduos provenientes de atividades

diversificadas. Segundo estes autores, os resíduos podem ser classificados quanto a sua incorporação em cerâmica vermelha como: resíduos combustíveis; cinzas; resíduos fundentes e resíduos redutores de plasticidade e plastificantes.

### *Resíduos Combustíveis*

Os resíduos combustíveis, em geral, possuem elevada quantidade de matéria orgânica que, quando queimados, provocam reações exotérmicas, com a liberação de calor para o processo. Esta categoria inclui resíduos de rejeitos urbanos, de estações de tratamento de água, da indústria têxtil e de curtume, resíduos derivados da extração e refino de petróleo e indústria de madeira e de papel. Uma desvantagem gerada pela incorporação de resíduos combustíveis é a liberação de gases, alguns podendo ser tóxicos, ocasionando um aumento da porosidade do material após o processo de queima.

### *Cinzas*

As cinzas são resíduos provenientes da queima de produtos com elevado teor de carbono, produzindo matéria inorgânica que não tem propriedades combustíveis. Pode-se citar como exemplo, a incineração de lixo urbano com objetivo de gerar energia, bem como reduzir o volume e a massa desses resíduos economizando espaço e promovendo a desinfecção do aterro com a queima da matéria orgânica.

### *Resíduos Fundentes*

Os resíduos fundentes são aqueles que diminuem o ponto de fusão das massas cerâmicas, representando um ganho energético de combustível para a queima das massas cerâmicas ou a formação de fase vítrea com características adequadas ao processo cerâmico. Esses resíduos são geralmente provenientes do resíduo de vidros, da lama de esmaltação das cerâmicas e dos rejeitos da indústria mecânica e metalúrgica.

### *Resíduos Redutores de Plasticidade e Plastificantes*

Os resíduos redutores de plasticidade e plastificantes caracterizam-se por serem materiais que, quando adicionados às massas cerâmicas, provocam a redução de sua plasticidade geral. Eles são provenientes de resíduos de vidros, das indústrias de mineração, beneficiamento mineral, apresentando composição química e granulométrica bastante variável, dependendo da origem do material. As quantidades de resíduos redutores de plasticidade incorporados às massas cerâmicas podem variar bastante, provocando mudanças nas propriedades mecânicas, retração linear e absorção de água.

VIEIRA e MONTEIRO (2009) propuseram uma nova classificação sobre a incorporação de diferentes tipos de resíduos sólidos em cerâmica vermelha: resíduos combustíveis; resíduos fundentes e resíduos que afetam as propriedades cerâmicas. Sendo:

#### *Resíduos Combustíveis*

Aqueles que apresentam alto poder calorífico devido à elevada concentração matéria orgânica. Essa categoria inclui resíduos da indústria de papel, lama de alto forno e resíduos derivados da extração e refino de petróleo.

#### *Resíduos Fundentes*

Aqueles que apresentam uma quantidade relativamente alta de metais alcalinos e alcalinos terrosos ( $K_2O$  e  $Na_2O$ ) que em reação com a sílica e a alumina promovem a formação de fase líquida aumentando a densificação. Nessa categoria os autores incluem resíduo de vidro, de serragem de rochas ornamentais e cinzas.

#### *Resíduos que Afetam as Propriedades Cerâmicas*

Aqueles que interferem na resistência mecânica, absorção de água e retração linear. Os autores classificam como resíduos que afetam as propriedades cerâmicas o chamote, resíduos de mineração, lodo de estação de tratamento de água e cinzas.

Os estudos sobre a incorporação de resíduos em cerâmicas vermelhas tem se tornado cada vez mais frequentes e assim se tornado alvo de grande interesse científico, visto que algumas vantagens são observadas. Além disso, a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha pode minimizar os prováveis impactos causados ao ambiente se forem descartados no meio.

### **3.3. Cerâmica**

Cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. O setor cerâmico é amplo e heterogêneo o que induz a dividi-lo em sub-setores ou segmentos em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Dessa forma, de acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica, a seguinte classificação, em geral, é adotada (ABC, 2013):

#### *Materiais de Revestimento (Placas Cerâmicas)*

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

#### *Cerâmica Branca*

É um grupo bastante diversificado, compreendendo materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor e que eram assim agrupados pela cor branca da massa, necessária por razões estéticas e/ou técnicas.

Dessa forma é mais adequado subdividir este grupo em: louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos para alta e baixa tensão, cerâmica artística (decorativa e utilitária) e cerâmica técnica para fins diversos (químico, elétrico, térmico e mecânico).

### *Materiais Refratários*

Este grupo compreende uma diversidade de produtos, que têm como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais, que em geral envolvem esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações. Para suportar estas solicitações e em função da natureza das mesmas, foram desenvolvidos inúmeros tipos de produtos, a partir de diferentes matérias-primas ou mistura destas. Dessa forma, pode-se classificar os produtos refratários quanto a matéria prima ou componentes químico principal em: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, mulita, magnesiano cromítico, cromítico-magnesiano, carbetto de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros.

### *Isolantes Térmicos*

Os produtos deste segmento podem ser classificados em:

- Refratários isolantes que se enquadram no segmento de refratários;
- Isolantes térmicos não refratários, compreendendo produtos como vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha, que são obtidos por processos distintos aos do item anterior e que podem ser utilizados, dependendo do tipo de produto até 1100 °C;
- Fibras ou lãs cerâmicas que apresentam características físicas semelhantes às citadas no item anterior, porém apresentam composições tais como sílica, sílica-alumina, alumina e zircônia, que dependendo do tipo, podem chegar a temperaturas de utilização de 2000 °C ou mais.

### *Fritas e Corantes*

Estes dois produtos são importantes matérias-primas para diversos segmentos cerâmicos que requerem determinados acabamentos. Frita (ou vidrado fritado) é um vidro moído, fabricado por indústrias especializadas a partir da fusão da mistura de diferentes matérias-primas. É aplicado na superfície do corpo cerâmico que, após a queima, adquire aspecto vítreo. Este acabamento tem por finalidade aprimorar a

estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar outras características.

Corantes constituem-se de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos obtidos a partir da mistura de óxidos ou de seus compostos. Os pigmentos são fabricados por empresas especializadas, inclusive por muitas das que produzem fritas, cuja obtenção envolve a mistura das matérias-primas, calcinação e moagem. Os corantes são adicionados aos esmaltes (vidrados) ou aos corpos cerâmicos para conferir-lhes colorações das mais diversas tonalidades e efeitos especiais.

### *Abrasivos*

Parte da indústria de abrasivos, por utilizarem matérias-primas e processos semelhantes aos da cerâmica, constituem-se num segmento cerâmico. Entre os produtos mais conhecidos pode-se citar o óxido de alumínio eletrofundido, o carbetto de silício e o diamante sintético.

### *Vidro, Cimento e Cal*

São três importantes segmentos cerâmicos e que, por suas particularidades, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica.

### *Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada*

O aprofundamento dos conhecimentos da ciência dos materiais proporcionou ao homem o desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento das existentes nas mais diferentes áreas, como aeroespacial, eletrônica, nuclear e muitas outras e que passaram a exigir materiais com qualidade excepcionalmente elevada. Tais materiais passaram a ser desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados.

Estes produtos, que podem apresentar os mais diferentes formatos, são fabricados pelo chamado segmento cerâmico de alta tecnologia ou cerâmica avançada. Eles são classificados, de acordo com suas funções, em: eletroeletrônicos, magnéticos, ópticos, químicos, térmicos, mecânicos, biológicos e nucleares. Os produtos deste segmento são de uso intenso e a cada dia tende a se

ampliar. Como alguns exemplos, pode-se citar: naves espaciais, satélites, usinas nucleares, materiais para implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedor de fogão, etc.

### *Cerâmica Vermelha*

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

Como o segmento de cerâmica vermelha é o tema desse projeto, a seção seguinte será destinada a mesma.

#### **3.3.1. Cerâmica vermelha**

A cerâmica vermelha, também conhecida como cerâmica estrutural, é caracterizada por produtos oriundos da argila ou misturas contendo argila, através de moldagem, secagem e queima. Caracteriza-se pela cor vermelha de seus produtos, que são tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais e agregados leve de argila expandida (MOTTA, *et al.*, 2001).

No que se refere à composição, o setor de cerâmica vermelha utiliza basicamente argila. As razões para isto são suas características, como apresentar plasticidade, resistência mecânica após queima adequada para uma série de aplicações, possibilitar a aplicação de técnicas de processamento simples, e também pela sua disponibilidade em grandes quantidades. (VIEIRA *et al.*, 2000).

A granulometria de uma argila tem função no processamento de cerâmica vermelha, devido à sua relação direta com a composição mineralógica. A chamada “fração argila”, associada a partículas com tamanho inferior a 2  $\mu\text{m}$ , é geralmente constituída de argilominerais, que são os principais responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade. A plasticidade é uma propriedade fundamental para permitir que massas argilosas alcancem a consistência plástica adequada para serem conformadas pelo processo de extrusão (VIEIRA *et al.*, 2007).

Será mais plástica a argila que apresentar maior quantidade de argilominerais, as quais são denominadas de “gordas” ou “fortes”. Isto significa também será necessário adicionar mais água para que se alcance o estado de consistência plástica. A utilização somente destas argilas em cerâmica vermelha pode trazer problemas de processamento, dificultando a etapa de conformação e secagem. Por outro lado, geralmente peças produzidas com estas apresentam uma resistência mecânica a verde e a seco satisfatória, pois as partículas de argilominerais apresentam uma boa coesão entre si. Entretanto, a baixa permeabilidade destas peças pode dificultar a saída de gases no estágio inicial de queima e podem retrair demasiadamente, acarretando defeitos no produto final (VIEIRA *et al.*, 2007).

Desta forma, argilas “magras” ou “fracas”, com menor teor de argilominerais e maior quantidade de quartzo, principal impureza das argilas, são geralmente utilizadas na formulação da massa cerâmica. As diferentes frações granulométricas que compõem uma argila comportam-se de maneira distinta durante a sinterização (VIEIRA *et al.*, 2007).

Além dos argilominerais, as argilas geralmente contêm outros materiais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, e podem conter também minerais não cristalinos (GAIDZINSKI, 2006).

Estes minerais presentes na argila podem ser divididos como minerais plásticos e minerais não plásticos, que, durante a queima, sofrem importantes transformações de caráter físico e químico. Além disso, podem ocorrer interações entre os diversos minerais constituintes das argilas os quais são também fortemente influenciados pelas condições de queima como atmosfera do forno, temperatura máxima e taxa de aquecimento/resfriamento (VIEIRA e MONTEIRO, 2003).

Nos minerais plásticos destacam-se reações de perda de água de constituição e transformações de fases. Da parte dos minerais não plásticos podem ocorrer decomposição de hidróxidos, oxidação de matéria orgânica, transformação alotrópica do quartzo, decomposição de carbonatos, transformações de fases, redução de compostos e formação de fase líquida, dentre outras (VIEIRA e MONTEIRO, 2003).

### **3.3.2. Polo cerâmico de Campos dos Goytacazes**

O município de Campos de Goytacazes está localizado no norte do Estado do Rio de Janeiro, possui área territorial de 4.027 km<sup>2</sup> com uma população de 463.000 habitantes. A cidade é o maior município do estado e está aproximadamente a 280 km da capital Rio de Janeiro (IBGE, 2013).

A região de Campos dos Goytacazes apresenta uma grande reserva de argilas, que motivou o desenvolvimento de um polo de cerâmica vermelha. Além de alguns fatores favoráveis como a disponibilidade de gás natural, a proximidade do segundo maior mercado consumidor do país e a facilidade de escoamento da produção, inclusive para o exterior (VIEIRA *et al.*, 2001).

A produção está voltada, sobretudo para a fabricação de blocos de vedação, produto de baixo valor agregado que corresponde a 90% da produção, além de uma pequena produção telhas, pisos extrudados, plaquetas para revestimento, bloco estrutural e tijolos aparente (VIEIRA *et al.*, 2003).

Os outros produtos, como por exemplo, as telhas apresentam porosidade excessiva acarretando absorção de água fora das especificações técnicas, justificando assim a pequena parcela produzida (VIEIRA *et al.*, 2003; 2004).

É característica local, os depósitos argilosos apresentarem dois tipos de argilas de forma estratificadas. Encontra-se uma argila "gorda" na camada inferior e uma argila "magra", porém de boa plasticidade, na camada superior. É prática comum a extração volumétrica destas argilas numa proporção de 1:1 para a fabricação de tijolos. Esta mistura é determinada de forma empírica, devido principalmente às facilidades de extração das matérias-primas nesta proporção (VIEIRA *et al.*, 2000).

### **3.3.3. Características das argilas de Campos dos Goytacazes**

As argilas de Campos dos Goytacazes apresentam como características principais a predominância da caulinita e a elevada plasticidade. As massas cerâmicas locais são geralmente elaboradas empiricamente pelas indústrias através da mistura das argilas "forte" e "fraca". Eventualmente, algumas cerâmicas utilizam areia do tipo quartzosa na composição de massa. A composição desta mistura é bastante variável e depende do tipo de argila utilizada, do tipo de produto que se

deseja fabricar e das próprias características das argilas na frente de lavra. (PINHEIRO e VIEIRA, 2011).

A massa cerâmica de Campos necessita de uma maior quantidade de água para sua conformação devido à excessiva plasticidade, o que retarda o processo de secagem e pode originar defeitos nas peças devido à elevada retração. De acordo com VIEIRA *et al.* (2003) a presença de hidróxido de alumínio (gibsita), contribui para aumentar a refratariedade e elevar a perda ao fogo das massas.

O mineral argiloso predominante nas argilas campistas é a caulinita, porém, é comum a presença de minerais tais como o quartzo, a mica, a goetita, a gibsita e o rutilo. As argilas possuem relativamente baixo teor de sílica e elevados teores de alumina revelando alto percentual de argilomineral e baixo teor de quartzo livre. Este elevado percentual de alumina que tende a aumentar a refratariedade das argilas de Campos (VIEIRA *et al.*, 2001).

Segundo VIEIRA (2001), as matérias-primas campistas apresentam teores elevados de perda ao fogo que estão relacionados com a fração significativa de argilomineral, e também apresentam baixos teores de óxidos alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ). Estes óxidos são os principais responsáveis pela formação de fase líquida. Em temperaturas superiores a  $1000^\circ\text{C}$  ocorre uma reação destes óxidos com a  $\text{SiO}_2$  proveniente da decomposição dos argilominerais formando fase líquida que promovendo a densificação do material. Portanto, para a fabricação de produtos de maior valor agregado pelo pólo cerâmico de Campos há a necessidade de desenvolvimento de massas com teores mais elevados de sílica livre e de óxidos alcalinos.

A produção de telhas cerâmicas ou outros produtos de elevado valor agregado e de menor porosidade só podem ser obtidos com a incorporação de material não plástico que pode ainda fornecer óxidos alcalinos para facilitar a formação de fase líquida durante a etapa de queima. Pesquisas realizadas com as argilas de Campos sugerem trabalhar na composição da massa no sentido de aumentar o teor de fundentes (VIEIRA *et al.*, 2000; PEÇANHA JR. *et al.*, 2005; PEREIRA *et al.*, 2011).

### **3.4. Lodo de ETA**

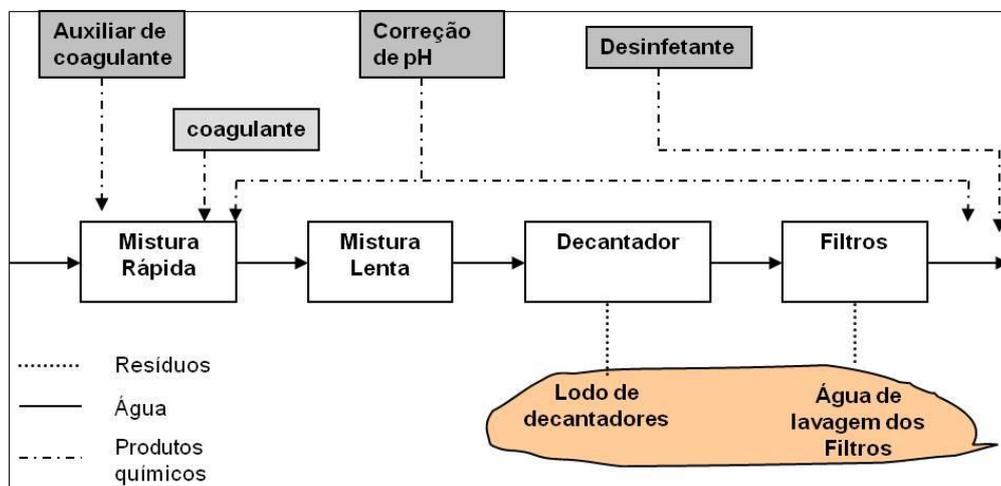
Nos últimos anos, pesquisas têm sido realizadas visando à reutilização de lodo de ETA. O reaproveitamento tem-se tornado cada vez mais importante no fator ambiental.

Segundo GÖTTSCHING e PAKARINEN (2000), os mais diversos destinos do lodo podem ser: a incineração com recuperação de energia, e o uso das cinzas ou simplesmente a incineração; o processo de compostagem e seu uso na agricultura; na produção de cimento; fabricação de tijolos, produção de concreto; na produção da massa para montagem de parede com areia, cal e os tijolos; na construção de rodovia e depósitos nos mais diversos aterros.

### 3.4.1. Resíduos gerados no tratamento de água

No processo de produção de água potável, considerado como uma das etapas da indústria da água há geração de resíduos devido à presença de impurezas na água bruta e aplicação de produtos químicos. Esses resíduos apresentam características e propriedades diversas e geralmente desconhecidas, dificultando a solução do problema.

Na Figura 3.7 observa-se uma ETA convencional de ciclo completo típico e os respectivos locais de geração de resíduos, que possuem tecnologia de ciclo completo, são o lodo de decantadores e a água de lavagem de filtros (ALAF) como podem ser observadas nas Figuras 3.8 e 3.9 abaixo. As principais perdas de água, neste tipo de sistema, ocorrem devido à necessidade de limpeza das unidades de tratamento para remoção de resíduos (lavagem de flocculadores, decantadores e filtros) e vazamentos nas unidades e/ou tubulações. O lodo é definido como resíduo sólido, e, portanto, deve estar em consonância com os preceitos da Lei 12.305/2010 (artigo 3º, inciso XVI) (BRASIL, 2010) e da série de normas NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004a).



**Figura 3.7** – Ilustração de uma ETA convencional e locais de geração dos resíduos. Fonte: Adaptado de CORDEIRO (2001).



**Figura 3.8** – Resíduos de ETAs (Lodo de decantador). Fonte: BARROSO (2008).



**Figura 3.9** – Resíduos de ETAs (Água de lavagem dos filtros). Fonte: BARROSO (2008).

No Brasil, a implantação de sistemas de tratamento de água está sujeita ao licenciamento ambiental, conforme a Resolução 237 de 19 de dezembro de 1997 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) (BRASIL, 1997b). Esta é uma obra de utilidade pública causadora de impactos ambientais negativos, com o lançamento de resíduos provenientes dos decantadores e da ALAF em corpos d'água. A Política

Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (Lei 9.433/97) estabelece que, o lançamento de resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final em corpos d'água, além de outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água, está sujeita à outorga do Poder Público (BRASIL, 1997a).

### **3.4.2. Características do lodo de ETA**

GODBOLD *et al.* (2003) *apud* KATAYAMA (2012) definem “lodo” como todo resíduo proveniente do tratamento para produzir água potável a partir da água bruta. De acordo com os autores, o termo “resíduo sólido” é mais adequado do que o termo “lodo”, porque o último tende a possuir uma conotação negativa, quando considerado para aplicações de reúso/reciclagem. Este resíduo é composto basicamente de impurezas removidas da água em conjunto com os produtos químicos de tratamento utilizados, e, tipicamente, compreende até 5% da produção anual da ETA.

O volume e massa de resíduos produzidos por uma ETA são determinados, entre outros fatores, principalmente pela qualidade da água de captação (dada pela sua turbidez ou concentração de sólidos); a tecnologia de tratamento empregada; as metas de tratamento (níveis de turbidez e dureza a serem atingidos pelo tratamento) e a maneira pela qual as ETAs são operadas. Em cada unidade na qual ocorre a remoção de sólidos da fase líquida, o princípio de remoção, o procedimento operacional e o tipo de produto químico adicionado (eventualmente mais que um) interagem para produzir resíduos em volumes e massas diferentes (CORNWELL *et al.*, 2006; DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

### **3.4.3. Composição química do lodo de ETA e ensaios de lixiviação e solubilização**

A Tabela 3.3 mostra uma síntese de resultados de composições químicas de amostras já caracterizadas de resíduos de ETA's. Do ponto de vista químico, o resíduo é constituído basicamente por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , onde os teores de sílica e alumínio mais elevados são características dos argilominerais, cabe ressaltar que o percentual de alumínio pode aumentar em virtude da quantidade de coagulante à

base de sulfato de alumínio, utilizado no tratamento da água. A presença do ferro faz com que o material cerâmico fique com a coloração avermelhada. A perda ao fogo do resíduo de ETA varia consideravelmente, podendo estar relacionada principalmente com a presença de argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica. Cabe destacar que as composições químicas podem variar consideravelmente em função das diferentes características dos mananciais que alimentam as ETAs.

A composição química do resíduo de ETA é muito semelhante a algumas das argilas usadas no Polo Ceramista da região de Campos dos Goytacazes, RJ.

**Tabela 3.3** – Composição química dos lodos de ETAs (% em peso) já caracterizados.

REFERÊNCIAS	COMPOSIÇÕES (% EM PESO)												
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CuO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	MnO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	*P. F.
Santos <i>et al.</i> (2000)	34,80	22,30	0,94	-	6,60	0,40	0,57	2,23	0,69	0,17	-	-	27,99
Portela <i>et al.</i> (2003)	14,10	23,62	0,35	-	8,39	0,33	-	0,02	0,15	-	-	0,34	49,01
Oliveira <i>et al.</i> (2004)	35,92	31,71	1,10	-	12,79	0,10	0,58	0,06	0,37	0,09	-	0,35	16,93
Ferranti e Gehling (2005)	37,28	25,63	0,84	-	9,97	0,29	-	0,09	0,74	0,05	-	0,75	25,15
Hoppen <i>et al.</i> (2005)	16,55	13,07	0,19	-	4,15	0,43	0,06	0,04	0,15	0,22	-	0,26	49,79
Margem <i>et al.</i> (2006)	34,27	47,70	0,93	-	17,73	0,31	0,34	-	-	0,45	-	1,26	57,73
Wolff <i>et al.</i> (2007)	37,70	30,50	1,00	-	12,40	0,20	-	0,20	0,40	0,30	-	0,30	-
Monteiro <i>et al.</i> (2008)	24,68	30,39	0,90	-	11,59	0,16	0,35	-	0,17	-	-	-	30,67
Souza <i>et al.</i> (2008)	37,03	32,69	1,13	-	13,05	0,10	0,60	0,06	0,39	0,10	-	0,36	14,50
Paixão <i>et al.</i> (2008)	12,60	8,60	-	0,10	73,00	5,20	-	-	-	0,50	-	-	-
Vitorino <i>et al.</i> (2009)	41,12	38,31	1,16	-	16,34	0,25	0,89	-	-	0,28	-	0,64	28,00
Medeiros <i>et al.</i> (2010)	21,12	35,96	0,93	0,01	10,32	0,26	0,89	-	0,00	0,03	-	0,19	30,12
Tartari <i>et al.</i> (2011)	24,10	31,60	2,20	-	18,60	-	0,30	-	-	-	2,80	-	20,40
Couto (2011)	14,66	32,26	0,47	-	11,80	1,63	0,53	-	-	-	1,17	2,53	34,97
Rodrigues <i>et al.</i> (2013)	29,59	31,18	1,04	-	10,21	0,34	1,27	-	-	0,14	1,61	-	24,50

\*Perda ao fogo

SILVA *et al.* (2012) realizaram um trabalho de classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes PAC (PAC- Policloreto de Alumínio) e natural (moringa oleífera), seguindo as normas ABNT NBR 10.004 (“Resíduos sólidos – Classificação”), ABNT NBR 10.005 (Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos”) e ABNT NBR 10.006 (“Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos”) segundo a análise de metais dos extratos lixiviado e solubilizado dos lodos.

Os ensaios de lixiviação e solubilização dos lodos indicaram que os lodos de PAC e moringa são classificados como resíduos CLASSE II A, Não perigoso – Não inerte. Mesmo com o uso de um coagulante natural, o lodo pode possuir uma alta concentração de metais pesados em sua composição, pois estes possivelmente são oriundos da água bruta utilizada no tratamento. Portanto os lodos devem ser dispostos de modo adequado, de forma a não causar danos ao meio ambiente e aos seres humanos.

#### *Lixiviado*

O extrato lixiviado, dos lodos de PAC e moringa, foi analisado frente a alguns parâmetros, apresentados nas Tabelas 3.4 3 3.5.

**Tabela 3.4 –** Concentração de metais do Lixiviado do lodo de PAC. SILVA *et al.* (2012).

PARÂMETROS	Média	Faixa	Limite NBR 10004 Anexo F
Alumínio (Al)	15,007	4,148 - 29,753	-
Arsênio (As)	0,543	n.d. - 0,905	1,0
Bário (Ba)	11,631	1,223 - 18,178	70,0
Cádmio (Cd)	0,016	0,007 - 0,025	0,5
Chumbo (Pb)	0,094	0,007 - 0,168	1,0
Cromo Total (Cr)	0,028	0,017 - 0,035	5,0
Mercúrio (Hg)	n.d.	n.d.	0,1
Prata (Ag)	0,003	n.d. - 0,005	5,0
Selênio (Se)	0,700	0,240 - 0,852	1,0

\* n.d. = não detectado pelo aparelho.

**Tabela 3.5** – Concentração de metais do Lixiviado do lodo de Moringa. SILVA *et al.* (2012).

PARÂMETROS	Média	Faixa	Limite NBR 10004 Anexo F
Alumínio (Al)	0,309	n.d. - 0,600	-
Arsênio (As)	0,73	0,265 - 0,921	1,0
Bário (Ba)	11,401	8,145 - 13,598	70,0
Cádmio (Cd)	0,008	0,004 - 0,013	0,5
Chumbo (Pb)	0,029	n.d. - 0,049	1,0
Cromo Total (Cr)	0,029	n.d. - 0,033	5,0
Mercurio (Hg)	0,004	n.d. - 0,018	0,1
Prata (Ag)	0,011	n.d. - 0,021	5,0
Selênio (Se)	0,249	n.d. - 0,587	1,0

\* n.d. = não detectado pelo aparelho.

De acordo com SILVA *et al.* (2012), os resultados obtidos pela análise do extrato lixiviado dos lodos estudados, encontram-se de acordo com a respectiva Norma Técnica, não excedendo os limites máximos estabelecidos, indicando que estas amostras de lodo não representam um resíduo com características de periculosidade (resíduo Classe I). Logo ambos os lodo são classificados como resíduos Classe II.

Apesar do Al não ser um parâmetro estabelecido pela norma para este tipo de análise, neste caso é de suma importância devido ao tipo de coagulante utilizado no tratamento da água bruta. Pode se observar que a concentração de alumínio em todas as amostras de PAC é muito alta quando comparado com as concentrações de alumínio nas amostras de Moringa.

### *Solubilizado*

Segundo SILVA *et al.* (2012), as Tabelas 3.6 e 3.7 mostram os resultados das análises dos metais do extrato solubilizado conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 10006.

**Tabela 3.6** – Concentração de metais do solubilizado do lodo de PAC. SILVA *et al.* (2012).

PARÂMETROS	Média	Faixa	Limite NBR 10004 Anexo G
Alumínio (Al)	0,389	n.d. - 0,872	0,2
Arsênio (As)	0,961	0,825 - 1,069	0,01
Bário (Ba)	5,053	4,719 - 5,387	0,7
Cádmio (Cd)	0,002	n.d. - 0,005	0,005
Chumbo (Pb)	0,006	n.d. - 0,014	0,001
Cobre (Cu)	0,024	n.d. - 0,050	2,0
Cromo Total (Cr)	0,026	0,025 - 0,027	0,05
Ferro(Fe)	1,317	0,361 - 2,372	0,3
Manganês (Mn)	9,736	0,468 - 19,636	0,1
Mercúrio (Hg)	n.d.	n.d.	0,001
Prata (Ag)	n.d.	n.d.	0,05
Selênio (Se)	0,444	0,229 - 0,740	0,01
Sódio (Na)	16,562	13,037 - 21,432	200
Zinco (Zn)	0,295	0,045 - 0,545	5,0

\* n.d. = não detectado pelo aparelho.

**Tabela 3.7** – Concentração de metais do solubilizado do lodo de moringa. SILVA *et al.* (2012).

PARÂMETROS	Média	Faixa	Limite NBR 10004 Anexo G
Alumínio (Al)	0,252	n.d. - 0,531	0,2
Arsênio (As)	1,062	0,783 - 1,207	0,01
Bário (Ba)	9,621	9,395 - 9,846	0,7
Cádmio (Cd)	0,002	n.d. - 0,005	0,005
Chumbo (Pb)	0,01	n.d. - 0,025	0,001
Cobre (Cu)	0,036	n.d. - 0,098	2,0
Cromo Total (Cr)	0,029	0,027 - 0,031	0,05
Ferro(Fe)	4,091	0,282 - 10,066	0,3
Manganês (Mn)	27,250	18,394 - 40,171	0,1
Mercurio (Hg)	n.d.	n.d.	0,001
Prata (Ag)	n.d.	n.d.	0,05
Selênio (Se)	0,434	0,198 - 0,649	0,01
Sódio (Na)	9,032	7,086 - 10,554	200
Zinco (Zn)	1,548	0,065 - 3,030	5,0

\* n.d. = não detectado pelo aparelho.

A análise do extrato obtido pela execução dos ensaios de solubilização, indica solubilização dos elementos Al, As, Ba, Pb, Fe, Mn e Se acima do limite máximo estabelecido neste ensaio, tanto no lodo proveniente do uso de coagulante químico quanto natural. Logo, ambos os lodos são classificados, segundo a norma técnica, como um resíduo Classe IIA, Não perigoso-Não Inerte.

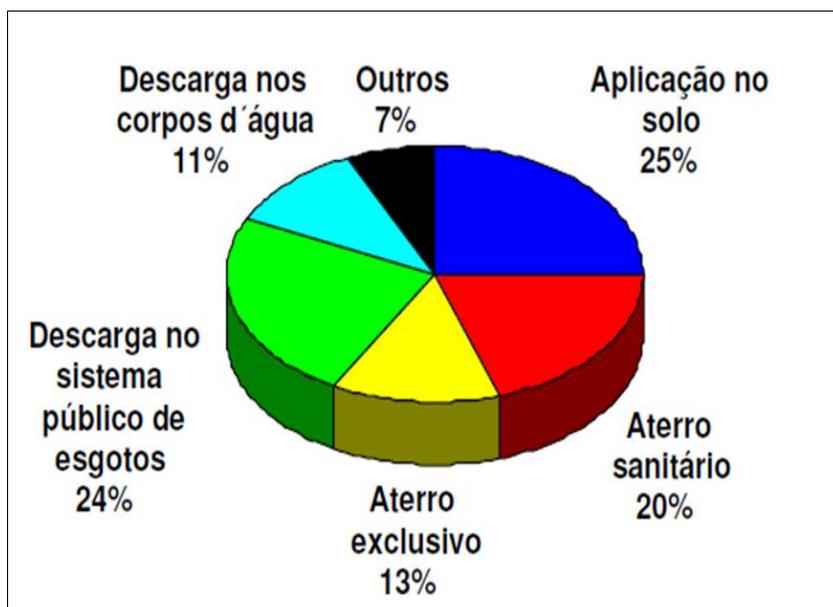
Os demais parâmetros quantificados no ensaio de solubilização se encontram dentro dos limites estabelecidos, não excedendo as concentrações máximas para o extrato solubilizado, estabelecidos pela norma técnica ABNT NBR 10.004, para este ensaio.

Mesmo com o uso de um coagulante natural o lodo pode possuir uma alta concentração de metais pesados em sua composição, pois estes possivelmente são oriundos da água bruta utilizada no tratamento.

### 3.4.4. Situação mundial do lodo de ETA

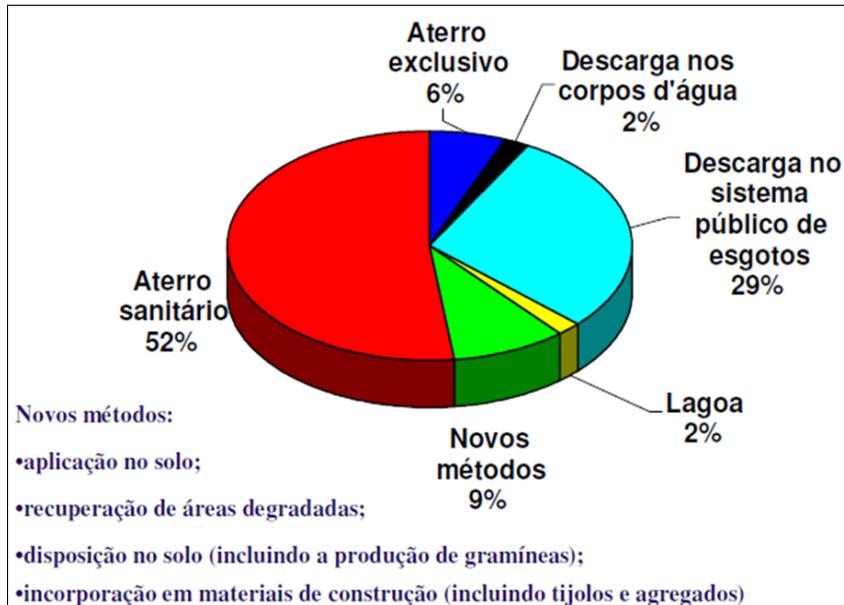
Idéias interessantes e viáveis têm surgido em países da Europa, no Japão e na Austrália, os mais engajados na pesquisa destas novas alternativas. Nestes países, foram testadas aplicações do lodo em áreas degradadas e agrícolas e em processos industriais como produção de cimento, alumínio e peças cerâmicas. Com algumas ressalvas, quase todas as experiências mostraram-se viáveis e eficientes, muitas vezes trazendo economia significativa, principalmente quando usadas como alternativas para substituir a disposição em aterros sanitários. Os maiores problemas encontrados estão associados à presença de material tóxico no resíduo; à dificuldade de adaptação dos diversos agentes envolvidos no processo (indústria, agricultor, etc.); os problemas com transporte (distância, volume de lodo, custo) e a dificuldades para adequar o lodo às necessidades do uso a que se pretende (CORNWELL, 2006).

CORNWELL *et al.* (2000) realizaram um levantamento sobre as formas de disposição final de lodos das ETAs nos Estados Unidos. Tais pesquisadores verificaram que 25% das ETAs aplicam o lodo no solo, 24% lançam-no em sistemas públicos de esgotos, 20% dispõem-no em aterro, 13% em aterro exclusivo e 7% realizam outras formas de disposição final. Apenas 11% das ETAs lançam o lodo nos corpos d'água (Figura 3.10).



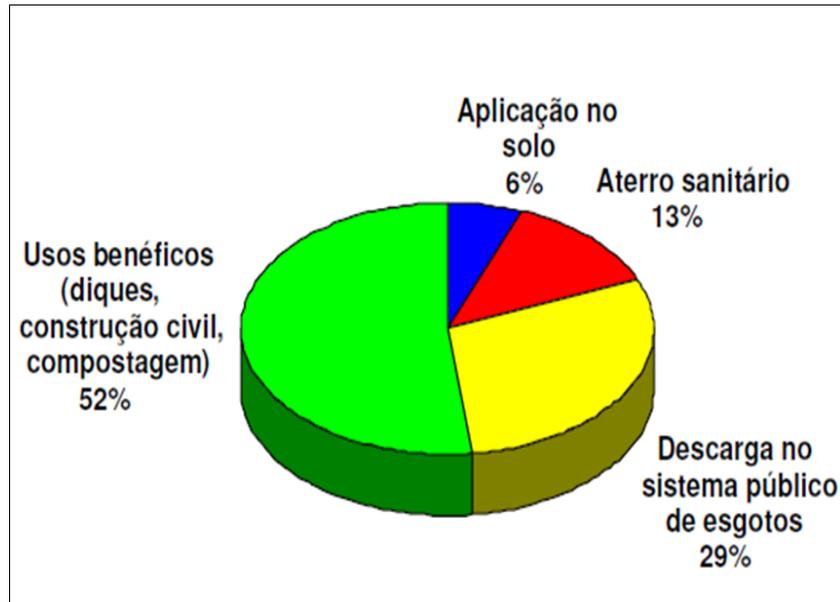
**Figura 3.10** – Disposição do lodo das ETA's nos EUA. Fonte: CORNWELL *et al.* (2000).

De acordo com SIMPSON *et al.* (2002), no Reino Unido, apenas 2% das ETAs lançam o lodo nos corpos d'água e há uma predominância de disposição final em aterros sanitários (52%), seguida de 29% que o lançam em sistemas públicos de esgoto, 9% têm novos métodos, 6% realizam tal processo em aterro exclusivo e 2% em lagoas (Figura 3.11).



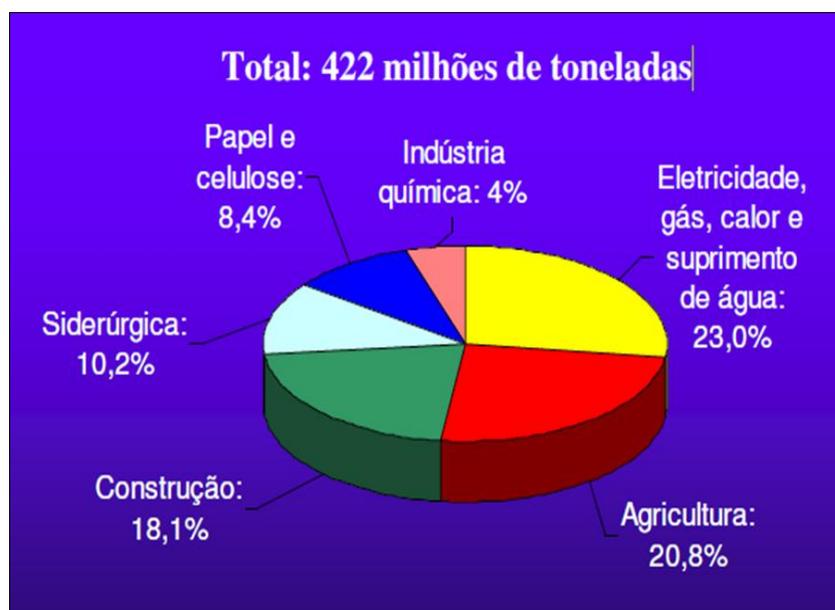
**Figura 3.11** – Disposição do lodo das ETA's no Reino Unido. Fonte: SIMPSON *et al.* (2002).

Na França, segundo ADLER (2002) 96% das 26.680 ETA's captavam água subterrânea e apenas 4% possuíam manancial superficial. A maioria das ETAs francesas são de pequeno porte (vazão inferior a 500 m<sup>3</sup>/h) e a produção de lodo em 384 ETA's é de 175 t/dia. Quanto à disposição final dos lodos, 29% lançavam em sistemas públicos de esgotos, 13% dispunham em aterros sanitários, 6% aplicavam os lodos no solo e 52% possuíam outras formas de disposição, entre elas compostagem, construção de diques e incorporação em materiais de construção civil (Figura 3.12).



**Figura 3.12** – Disposição do lodo das ETA's na França. Fonte: ADLER (2002).

Uma pesquisa nacional no Japão sobre o estado de descarga e tratamento de resíduos industriais no ano fiscal de 2005 (1 de Abril de 2005 - 31 de março de 2006) foi realizado e os resultados resumidos da seguinte forma (Figura 3.13).



**Figura 3.13** – Disposição do lodo das ETA's no Japão em 2005. Fonte: GOVERNO DO JAPÃO (2013).

Segundo PAULSRUD *et al.* (2002), na Noruega, as formas de disposição usuais de lodos de ETA's são: descarga nos corpos d'água; descarga nos sistemas públicos de 30 esgotos; aterros sanitários; recuperação de produtos químicos; co-disposição com lodos de estações de tratamento de esgotos e aplicação no solo. Até recentemente, os lodos das ETA's norueguesas ou eram descarregados nos

corpos d'água diretamente ou em sistemas públicos de esgotos. Esta última solução era aplicada no caso de ETA's localizadas próximas às estações de tratamento de esgotos que tivessem condições de receber os lodos. No entanto, este quadro tem sido alterado devido à crescente deterioração da qualidade da água bruta (problemas de gosto e odor) e ao impacto das descargas de lodos de ETA's nos corpos d'água receptores (baixo pH, altas concentrações de alumínio). A disposição em aterros tem sido abandonada por imposição de recente legislação europeia, que proíbe este tipo de prática. A quantidade de lodo produzido nas ETA's da Noruega é pequena e não torna a recuperação de coagulantes uma alternativa economicamente viável. Portanto, o enfoque tem sido na aplicação no solo e nos usos benéficos.

No Brasil, grande parte do lodo gerado em ETA's ainda é disposta em rios ou em aterros sanitários. Contudo, principalmente em grandes centros urbanos, condições de licenciamento ambiental restritivas e custos logísticos crescentes tem levantado interesse em usos benéficos para esse resíduo. Um obstáculo para a mudança de paradigma recai no fato de que muito raramente operadores e projetistas de ETA's nacionais conseguem prever, com algum grau de confiabilidade, a massa e volume de resíduos produzidos pelo tratamento da água bruta. Geralmente, usa-se para esse fim fórmulas empíricas, que relacionam a produção de lodo à concentração de sólidos em suspensão totais (SST) na água bruta e à dosagem de produtos químicos (KATAYAMA, 2012).

No Brasil, a frequência de remoção de lodo nos decantadores de ETA convencional de ciclo completo pode ser realizada em intervalos de até seis meses, pode gerar acúmulo de lodo com elevada concentração de contaminantes orgânicos e inorgânicos e também pode dificultar a remoção e disposição final. Assim, em algumas ETA's, é necessária a utilização de água em alta pressão a fim de auxiliar a remoção do lodo e raspadores manuais (rodos de madeira), que implica no contato direto de funcionários com este resíduo (ACHON, 2008).

No Estado de Minas Gerais foram coletadas informações de 175 municípios, mostrando que 87% das ETA's dos municípios mineiros avaliados lançam o lodo em corpos d'água sem tratamento, 6% não informaram, 3% possuem unidades de tratamento de resíduos (UTR), 2% lançam na rede pluvial, 1% em ETE e 1% no solo (MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2009).

No Estado de São Paulo, levantamentos preliminares realizados na Bacia PCJ (Piracicaba, Capivari e Jundiaí) indicaram que 56% (em termos populacionais) lançam o lodo de ETA em corpos d'água, 21% em aterro, 15% não disponibilizaram dados, 6% em ETEs e 1% em outros locais (PCJ, 2011).

#### **3.4.5. Pesquisas realizadas com lodo de ETA em cerâmica vermelha**

O setor cerâmico é o que mais absorve o aproveitamento de resíduos, sendo esses das mais variadas composições, sendo um processo atrativo tanto para o setor cerâmico, no sentido de redução de matéria prima e possibilidade de produtos com melhores propriedades, quanto para as indústrias geradoras de resíduos.

Utilização na fabricação de tijolos: as características físicas e químicas de lodos de ETAs são, muitas vezes, similares às dos materiais utilizados na fabricação de tijolos: argilas. As grandes quantidades de lodos gerados em ETAs podem diminuir a quantidade de argila utilizada na fabricação de tijolos, aumentando a vida útil das jazidas naturais.

A seguir são apresentados, sucintamente, alguns trabalhos relacionados ao reaproveitamento de lodo de ETA em cerâmica vermelha.

TSUTIYA *et al.* (2001) estudaram a utilização do lodo de ETA na fabricação de tijolo cerâmico, na Carolina do Norte - EUA (Estados Unidos da América), mais de 15% do lodo produzido é utilizado na fabricação de tijolos, sem nenhum impacto negativo na qualidade estrutural do produto. O lodo de ETA pode ser utilizado na fabricação de tijolos por possuir propriedades físicas e químicas similares a argila natural utilizada na fabricação dos tijolos. Algumas características do lodo são de fundamental importância o seu conhecimento, pois o lodo com a presença de cal compromete a qualidade do tijolo produzido, inviabilizando a sua utilização, por outro lado lodos contendo hidróxido de ferro ou bário, atribuem ao tijolo, coloração avermelhada, o que é desejado pelos fabricantes.

SABBAG (2003) realizou estudos sobre a reutilização de lodo da ETA de Cubatão em misturas de argilas para produção de blocos cerâmicos. Descobriu que o lodo pode ser incorporado em até 12,5% à massa de argila, em função dos valores obtidos de resistência a compressão dos blocos idênticos aos obtidos somente com argila, com baixa retração e resistência a compressão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7171/92.

OLIVEIRA *et al.* (2004) avaliaram a ETA de Campos dos Goytacazes/ RJ, onde foram estudadas as características mineralógicas e físico-químicas do resíduo visando seu aproveitamento como matéria prima na indústria de cerâmica vermelha. Concluiu-se que o resíduo é plástico (IP = 20%), rico principalmente em SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e constituído de caulinita, mica, sílica e gibsita, com predominância de caulinita. Devido ao alto valor do limite de plasticidade do resíduo, recomenda-se que seja utilizado em cerâmica vermelha somente como constituinte de formulações argilosas adicionado em quantidades adequadas.

Quanto mais a distribuição granulométrica do lodo for similar à da argila, melhor sua aplicabilidade. Por isso, a presença de areia e de pó de carvão no lodo de ETA pode provocar alterações no comportamento do material cerâmico, como causar expansão e fissuras ao produto final, porque a areia e o pó de carvão são constituídos de partículas de tamanhos consideravelmente maiores que as das argilas. Entretanto, deve-se salientar que certa quantidade de carvão é adicionada na massa antes dela passar por misturadores na etapa de homogeneização (ANDRADE, 2005 *apud* KATAYAMA, 2012).

HOPPEN *et al.* (2005) analisaram a co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental, e observaram que, nas condições e parâmetros adotados, os traços de concreto contendo até 5% de lodo podem ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de artefatos, blocos e peças de concreto (como placas de estai para redes de distribuição de energia elétrica, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, e pedestais para apoio de equipamentos) até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido).

Para teores acima deste, a sua utilização restringe-se a aplicações em que a trabalhabilidade não é um parâmetro primordial como: contrapisos, blocos e placas de vedação, peças decorativas, calçadas e pavimentos residenciais, entre outras. Verificou-se, também, que a baixa resistência do traço contendo 10% de lodo foi resultado, provavelmente, da elevada consistência, a qual comprometeu o adensamento e a qualidade dos corpos de prova. Apesar de ocorrer redução na qualidade do concreto com a incorporação do lodo de ETA, sua utilização como forma de imobilização e co-disposição do resíduo pode ser considerada interessante do ponto de vista ambiental. Constatou-se que a adição do lodo de ETA em matrizes

de concreto é uma alternativa viável e ambientalmente correta, uma vez que promove redução de quantidades consideráveis deste material a serem dispostas em aterros ou devolvidas a cursos d'água, bem como reduções significativas no consumo de agregados naturais e, principalmente, de cimento.

ANDRADE (2005) pesquisou os impactos causados pela incorporação de resíduos de lodo de ETA, no processo produtivo de uma indústria cerâmica, desde o armazenamento do resíduo no pátio até pós-consumo do bloco, concluindo que a utilização do resíduo em referência neste processo produtivo, não causa impactos significativos ao meio ambiente e ao trabalhador.

TEIXEIRA *et al.* (2006) avaliaram o efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural e observaram com os dados obtidos que o lodo de ETA pode ser incorporado em massa cerâmica usada para produzir tijolos e telhas. A incorporação dos lodos, em geral, piora as propriedades físicas e tecnológicas do material cerâmico e os resultados obtidos para o lodo da ETA-Al foram sempre piores que os com ETA-Fe. Tendo-se como referências a Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) e a Absorção de Água (AA), para os CPs queimados, pode-se concluir que: para a argila usada como matriz (argila de Indiana) foi observado que é possível adicionar 10% do lodo ETA-Al e 20% do lodo ETA-Fe, para temperaturas de queima a partir de 950°C. As propriedades físicas e cerâmicas do lodo e, principalmente, da argila irão definir a possibilidade ou não de incorporação e a concentração, para cada temperatura de queima.

PAIXÃO *et al.* (2008) estudaram o efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa e constataram que o lodo de ETA analisado, apresentou partículas grossas e angulares, elevado teor de ferro e predominância de composto com estrutura amorfa. O lodo calcinado a 1000 °C transformou-se, principalmente, em hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), com 18% de perda de massa, e as partículas mantiveram a forma original. A adição do lodo em uma massa de cerâmica vermelha em frações de 2 a 10%, em peso causou diminuição da resistência à flexão do corpo seco a 110 °C, devido, principalmente, à redução da retração linear de secagem. As partículas de lodo interagiram pouco com a matriz argilosa até 1000 °C. Acima desta temperatura, o lodo reagiu com a massa cerâmica e aumentou significativamente a retração linear. Até 1000 °C, a incorporação do lodo pouco afetou a retração linear da cerâmica, mas aumentou a absorção de água e

diminuiu a resistência à flexão. Os efeitos deletérios da incorporação do lodo foram causados pela formação de microtrincas ao redor das partículas. A forma angular das partículas parece explicar o rápido decréscimo da resistência à flexão com a adição de apenas 2% de lodo. A calcinação e a cominuição do lodo possibilitaram aumentar a resistência à flexão em relação à incorporação do lodo bruto, diminuindo a severidade das microtrincas.

MARGEM (2008) pesquisou a introdução de lodo da operação de limpeza dos tanques de decantação de ETA em cerâmica vermelha. As amostras com até 10% em peso de resíduo, aumentou a absorção de água e diminuiu a resistência mecânica após a fase de queima da cerâmica. Isto ocorreu devido à elevada perda de massa do resíduo durante a etapa de queima. A reciclagem deste tipo de resíduo de ETA em cerâmica vermelha deve ser realizada em pequenas quantidades para não prejudicar a qualidade da cerâmica.

OLIVEIRA *et al.* (2008) observaram que o resíduo de ETA pode ser incorporado como matéria prima alternativa na formulação de massa argilosa para a fabricação de cerâmica vermelha. O resíduo de ETA estudado, quando adicionado em quantidades de até 15% em peso a uma massa argilosa industrial para fabricação de cerâmica vermelha não apresentou efeitos significativos sobre a microestrutura e as propriedades físico-mecânicas avaliadas (retração linear, absorção de água, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão). O efeito da temperatura de queima foi o de aumentar o grau de sinterização das massas cerâmicas, sobretudo acima de 950 °C, com influência marcante sobre a microestrutura e propriedades estudadas.

SOUZA *et al.* (2008) realizaram uma análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água, onde o lodo de ETA efetivamente contribui para aumentar as emissões dos gases CO<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub> durante o processo de queima de cerâmica vermelha, visto que o CO é consequência das condições atmosféricas do forno, ou seja, se estiver rico em oxigênio a concentração de CO<sub>2</sub> será bem maior que a do CO. Portanto, há uma grande preocupação sob o aspecto ambiental em avaliar a aplicação deste resíduo na produção em larga escala de cerâmica vermelha.

VIEIRA *et al.* (2008) estudaram alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA, onde avaliaram as alterações microestruturais de cerâmica argilosa queimada a 700°C incorporada com lodo de

filtro de ETA, e concluíram que a incorporação de lodo de ETA aumenta os defeitos microestruturais da cerâmica argilosa. Isto ocorre, sobretudo, devido à eliminação de matéria orgânica durante a etapa de queima. A cerâmica argilosa queimada a 700°C apresenta uma matriz amorfa de alumínio silicato com fases cristalinas secundárias de quartzo, mica muscovita e hematita. A incorporação de lodo ETA possibilita o aparecimento de alumina e fase de feldspática. Os resultados obtidos comprovam que a reciclagem de lodo de ETA em cerâmica argilosa deve ser realizada em pequenos percentuais para minimizar seu efeito deletério na qualidade da cerâmica.

TARTARI (2008) avaliou a incorporação de lodo gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha, e conclui que em todos os testes realizados, as retrações lineares não ultrapassaram os requisitos normativos de 15%, entretanto, porcentagem significativa de matéria orgânica presente no lodo contribuiu para contração linear da peça cerâmica, deformações e defeitos na estrutura quando em elevadas concentrações de lodo acima de 8%, onde não apresentaram propriedades satisfatórias, devido aumento na perda de massa, menor resistência mecânica e o aparecimento de defeitos de trincas nas peças cerâmicas, portanto o lodo pode substituir parcialmente as argilas com características físico-químicas e mineralógicas similares.

VITORINO *et al.* (2009) pesquisaram a caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa, concluíram que o resíduo do desarenador possui alto teor de  $\text{SiO}_2$ , associado, sobretudo, às partículas de quartzo. Embora sua distribuição de tamanho de partículas seja a mais larga dentre os resíduos investigados, ainda está compatível com o processamento de cerâmica vermelha. Os resíduos do decantador e do filtro apresentaram pequeno tamanho médio de partículas e, também, uma constituição mineralógica similar a das argilas, com predomínio de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Estes resíduos revelaram um valor elevado de perda ao fogo, associado à perda de água de hidróxidos, combustão de matéria orgânica e eliminação de água de constituição da caulinita. O resíduo do desarenador atuou como desplastificante, sendo benéfico à plasticidade/trabalhabilidade da cerâmica argilosa. Em relação às propriedades de queima, este resíduo reduziu a absorção de água e a retração linear da cerâmica. Por outro lado, mostrou, também, uma tendência à redução da resistência mecânica da cerâmica. Os resíduos do decantador e do filtro praticamente não alteraram a

plasticidade/trabalhabilidade da cerâmica argilosa. Em relação às propriedades de queima, aumentaram a absorção de água e reduziram a resistência mecânica da cerâmica.

Os autores VITORINO *et al.* (2009) ressaltaram que os resultados indicam que o resíduo do desarenador apresenta maior potencial para ser incorporado em cerâmica argilosa. A maior restrição está relacionada à redução da resistência mecânica da cerâmica. Desta forma, deve-se incorporar quantidades que possibilitem à cerâmica alcançar os valores estipulados por norma para determinado tipo de produto. Os resíduos do decantador e do filtro podem ser incorporados em pequenas quantidades em cerâmica argilosa para uma destinação ambientalmente correta dos mesmos. A quantidade de matéria orgânica, ao redor de 9% em peso, não deve trazer economia significativa de energia durante a etapa de queima. Por outro lado, lodos de ETA com maior carga orgânica podem contribuir para a redução do gasto energético da cerâmica durante a etapa de queima. Além disso, devido ao elevado teor de água destes resíduos, deve-se realizar uma etapa de desaguamento e posterior filtro-prensagem para seu transporte às cerâmicas.

POZZOBON *et al.* (2010) investigaram a aplicação de lodo de estação de tratamento de água para a produção de cerâmica artística e constataram que é possível incorporar lodo de ETA à massa cerâmica para a fabricação de artefatos artísticos. Entretanto, o lodo deve ser submetido a tratamento prévio, uma vez que o lodo in natura favorece a ocorrência de defeitos nas peças sinterizadas. O método de beneficiamento para adequar o lodo ao uso em cerâmica artística consiste na secagem e moagem deste. Comparando-se porosidade aparente, absorção de água e na avaliação visual de peças sinterizadas com 12% e 15% de lodo beneficiado, verificou-se um desempenho similar entre as duas composições. Para contração linear e resistência à compressão, observou-se, respectivamente, maior resistência e menor contração para peças com 12% e 15% de lodo, sendo possível usar satisfatoriamente uma ou outra composição, dependendo da característica de maior interesse para o desempenho da peça cerâmica. Através do ensaio de lixiviação, identificou-se que peças cerâmicas contendo lodo são impróprias para a confecção de utensílios que fiquem em contato com alimentos ou bebidas, sendo, portanto, mais adequado o uso do lodo em peças decorativas.

MEDEIROS (2010) objetivou a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, lodo de ETA- Estação de Tratamento de Água e cinza de lenha em massa

cerâmica. Uma mistura entre os três resíduos foi estudada e concluindo-se que se pode utilizar até 25% de resíduo em relação à massa cerâmica, atingindo uma temperatura de até 1150 °C, sem comprometer as características desejadas no produto cerâmico.

TARTARI *et al.* (2011a) realizaram pesquisa do lodo gerado na Estação de Tratamento de Água da unidade Tamanduá de Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. O trabalho foi dividido em duas partes, na parte I: “*Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense*”, eles observaram que ele não pode ser usado como componente majoritário em massas cerâmicas, devido suas características de desplastificante, grande porcentagem de grãos de tamanho grosseiro e elevada perda ao fogo. As argilas classificadas como OP e AP apresentaram propriedades de alta plasticidade, caracterizadas como sendo argilas inorgânicas com granulometria favorável para produção de cerâmica vermelha, e baixa perda ao fogo. As argilas denominadas AA e OA foram caracterizadas como argilas formadas por siltes inorgânicos de alta compressibilidade, com percentual de areia de quartzo de mediana plasticidade. A composição química majoritária das matérias-primas são formadas por  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , entretanto em percentuais diferenciados, com destaque para o lodo com 31,6% de  $Al_2O_3$  o que deve-se a influência do coagulante utilizado no processo convencional de tratamento da água. O lodo por si só não pode ser usado como componente majoritário em massas cerâmicas, porém pode ser incorporado como aditivo em massas argilosas. A empresa de Saneamento do estado do Paraná está sendo sinalizada para o gerenciamento de seus resíduos, portanto, a alternativa de incorporação de lodo à massa cerâmica é fundamental para solucionar a disposição final deste resíduo.

Na parte II: “*Incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha*” eles concluíram que, o melhor empacotamento dos grãos ocorreu com a adição de 70% das argilas AP e OP nas misturas, contribuindo diretamente para os resultados de menor absorção de água e maior resistência mecânica, devido à característica de plasticidade dessas argilas que diretamente influenciaram na melhoria da formulação da massa cerâmica. Em todos os casos, as retrações lineares não ultrapassaram os requisitos normativos de 15%, entretanto, a perda ao fogo elevada do lodo contribuiu para o aumento da contração linear da peça cerâmica. Adições de lodo superiores a 8% nas composições alteram

negativamente as propriedades físico-mecânicas favorecendo o surgimento de trincas e deformações nas peças cerâmicas. A produção de tijolos pelo processo de extrusão apresentou viabilidade em receber porcentagens admissíveis de lodo à massa com umidade real de saída da centrífuga na preparação da massa para fabricação de cerâmica vermelha. Os resultados mostraram que o lodo gerado na Estação de Tratamento de Água da unidade Tamanduá em Foz do Iguaçu, PR, não pode ser usado como componente majoritário em massas cerâmicas. No entanto, este resíduo pode ser usado em pequenas quantidades em massas argilosas (até o limite de 8%), nas condições de umidade reais de saída da centrífuga, vista a redução da exploração da matéria-prima argila e contribuindo também para a economia na adição de água no processo de produção de cerâmica vermelha por extrusão (TARTARI *et al.* (2011b).

RODRIGUES (2012) investigou a incorporação de resíduo de estação de tratamento de água de Campos dos Goytacazes em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento, concluindo que o resíduo de ETA é constituído quimicamente principalmente por sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Além disso, o resíduo de ETA contém uma grande quantidade de matéria orgânica (25,86 %) e alta perda ao fogo (24,5 %). Do ponto de vista mineralógico, o resíduo de ETA é constituído principalmente por caulinita. Do ponto de vista físico, o resíduo de ETA utilizado apresenta alto teor de partículas finas (< 2 µm) (35 %), principalmente de partículas lamelares de caulinita e é um material argiloso de alta plasticidade (IP = 25,4 %).

Do ponto de vista ambiental, o resíduo de ETA foi classificado como um resíduo de Classe II A, ou seja, resíduo não perigoso (Classe II) e não inerte (A).

O resíduo de ETA quando incorporado à massa de solo e cimento pura modifica as características física, química e mineralógica dela. A adição do resíduo de ETA incorpora partículas finas e aumenta a plasticidade na massa cimentícia pura.

Análise mineralógica nas amostras incorporadas indicou que a incorporação do resíduo de ETA na massa de solo e cimento pura não modificou as fases cristalinas majoritárias, mas introduziu novas fases como etringita, portlandita e silicato de cálcio hidratado, provenientes da hidratação do cimento. Além disso, a adição do resíduo de ETA tende a modificar as intensidades dos picos de difração.

Foi verificado que a incorporação do resíduo de ETA influencia a microestrutura dos corpos cimentícios. Em geral os corpos cimentícios de solo-cimento contendo resíduo de ETA são mais porosos.

GHIZONI (2013) estudou a possibilidade da fabricação de pastilhas cerâmicas com lodo proveniente de estação de tratamento de água – estudo de caso, ETA - Pato Branco, Paraná, e concluiu que com os 6 traços estudados observou-se que a quantidade ideal de lodo era de 10%, para que se obtenha uma pastilha de boa qualidade. Os 2 traços escolhidos para a sequência do estudo, obtiveram uma boa resistência, deixando claro, que a composição na parte da resistência está bem definida, podendo ainda realizar a substituição do cal pelo gesso, para verificação da facilidade de compactação das amostras durante o processo de fabricação, se diminui o índice de peças com presença de trincas, por ser um material inerte podendo ou não substituir a areia, ou ainda trabalhar em paralelo para diminuir o índice de retração.

Analisando os resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização do lodo da ETA de Pato Branco pode ser realizada para a confecção de pastilhas cerâmicas de artesanato para comunidade carente. Porém alguns fatores devem ser melhorados, o principal desses fatores para que o produto possa ser fabricado, refere-se ao seu processo de produção, tendo como necessidade um estudo mais aprofundado de um molde e um método mais eficaz para a divisão das pastilhas, diminuindo assim a chance das peças apresentarem trincas e variação de tamanhos ocasionados pelo processo construtivo.

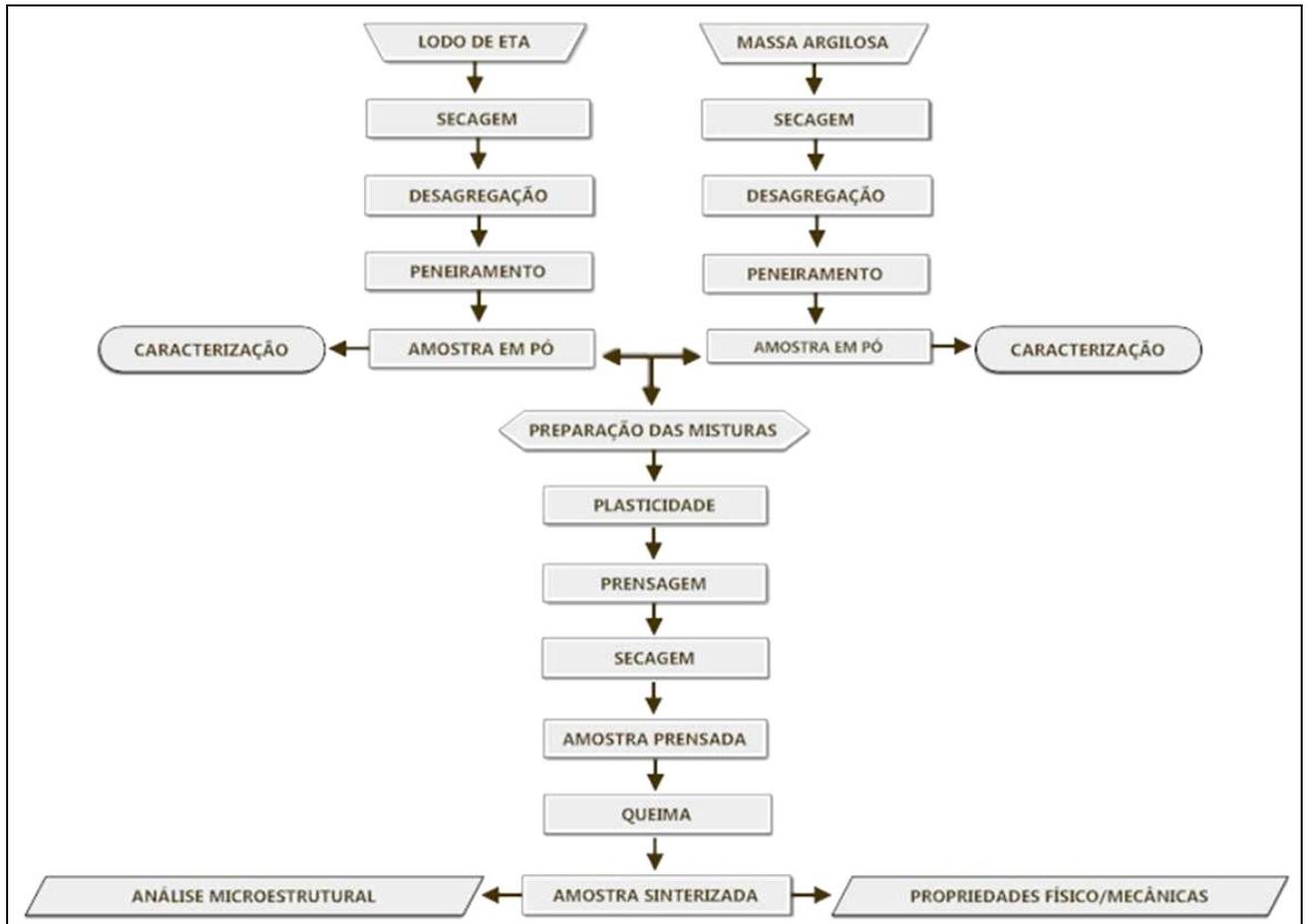
TAKADA *et al.* (2013) investigaram o aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água no município de Palmas – TO e concluíram que o lodo de ETA do município de Palmas – TO tem como potenciais usos a incorporação de lodo de ETA na fabricação de cerâmica vermelha, disposição em aterros sanitários e a recuperação de áreas degradadas.

A incorporação do lodo de ETA na fabricação de cerâmica vermelha, além de ser uma forma de disposição desse resíduo, mostra-se uma alternativa ambientalmente correta, visto que reduz a quantidade de matéria-prima necessária para sua fabricação. Sendo assim, esta seria a alternativa que apresentaria maior benefício ao meio ambiente. Há ainda a disposição no aterro sanitário, onde o lodo seria utilizado como material de cobertura e a recuperação de áreas degradadas, em que o resíduo da ETA auxiliaria na recomposição dessas áreas.

Os trabalhos apresentados anteriormente relatam situações e resultados de outras ETA's, onde obtiveram resultados com variações nas suas características com aplicações em diferentes tipos de argila, tendo já obtido conhecimento sobre outras situações, neste presente trabalho, será apresentada uma forma de mitigar este lodo que é gerado no processo de decantação da Estação de Tratamento de Água incorporando ele na argila.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão descritos os materiais e os métodos empregados para caracterização das matérias primas, confecção dos corpos de prova, determinação de propriedades das cerâmicas produzidas e seus aspectos microestruturais. O fluxograma da Figura 4.1 descreve a sequência experimental do trabalho.

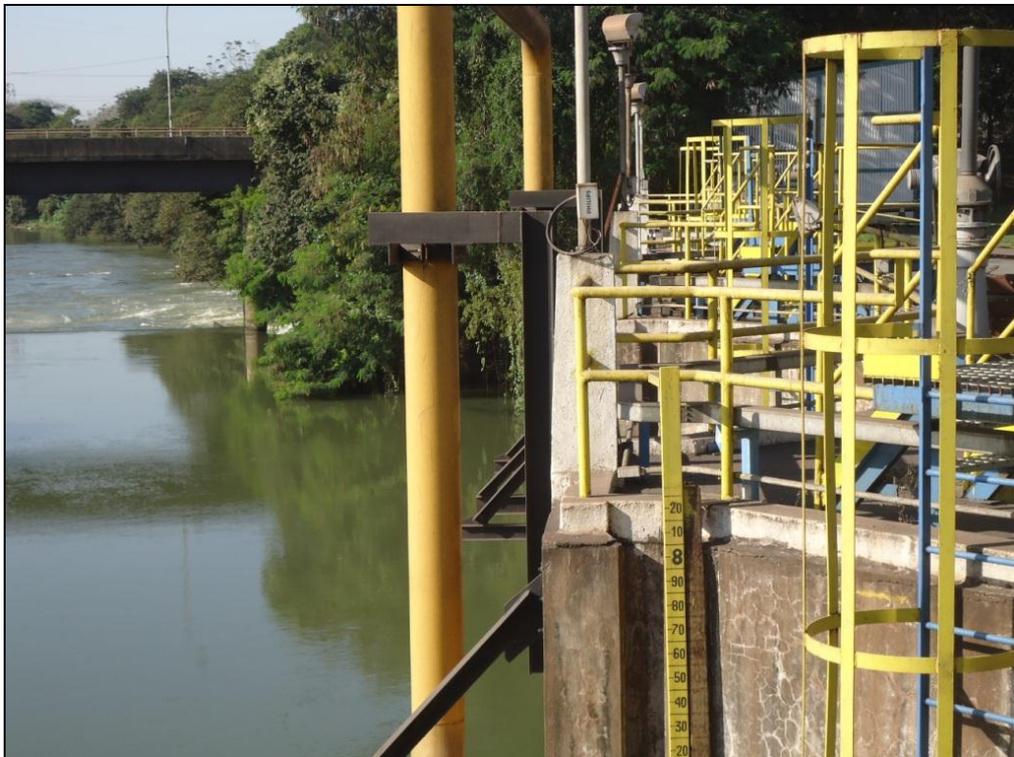


**Figura 4.1** – Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental.

#### 4.1. Materiais

Nesse trabalho foram utilizadas como matérias primas uma massa cerâmica argilosa coletada na Arte Cerâmica Sardinha em Campos do Goytacazes - RJ e o lodo é proveniente da estação de tratamento de água da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN de Volta Redonda-RJ, que faz a captação de água do Rio Paraíba do Sul. Cabe destacar que a água é tratada com sulfato de alumínio ferroso e um floculante orgânico para que ocorra a decantação.

O resíduo (lodo) da etapa de beneficiamento da água é centrifugado e encaminhado a um aterro industrial específico. As Figuras 4.2 a 4.11 ilustram a ETA da CSN.



**Figura 4.2** – Captação de água do Rio Paraíba do Sul.



**Figura 4.3** – Canal de captação.



**Figura 4.4** – Sistema primário de peneiramento de particulados em suspensão na água bruta.



**Figura 4.5** – Detalhe da peneira.



**Figura 4.6** – Bacia de decantação para separação de argila e areia.



**Figura 4.7** – Estação de floculação e tanques de filtração.



**Figura 4.8** – Etapa de floculação.



**Figura 4.9** – Saída de água clarificada.



**Figura 4.10** – Estação de centrifugação da lama floculada.



**Figura 4.11** – Saída da lama centrifugada.

## **4.2. Métodos**

### **4.2.1. Caracterização das matérias primas**

Após coleta, as matérias primas foram secas em estufa de laboratório a 110°C por 24 horas e posteriormente foram desagregadas em almofariz de porcelana até passagem completa em peneira de 20 mesh. Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentadas a massa cerâmica argilosa e o lodo amarelo de ETA, respectivamente.



**Figura 4.12** – Massa cerâmica argilosa



**Figura 4.13** – Lodo amarelo de ETA

#### **4.2.1.1. Caracterização mineralógica**

A composição mineralógica qualitativa das matérias primas foi obtida por meio de difração de raios-X (DRX) em amostras na forma de pó utilizando um difratômetro Panalytical, modelo Empyrean, operando com radiação Cu- $\alpha$  e  $2\theta$  variando de 5 a 60°, passo de 0,02° e tempo de 5s por passo. A identificação das amostras analisadas foi obtida por comparação com arquivos do padrão JCPDS (Joint Committee on Diffraction Standards).

As análises termo gravimétrica (TG) térmica diferencial (DTA) foram obtidas em um analisador térmico Setaram, da USP. A massa das amostras foram de  $30 \pm 5$ mg, aquecidas ao ar em cadinhos de alumina, com faixa de temperatura entre 28 a 1200°C e taxa de aquecimento de 10°C/min.

#### **4.2.1.2. Caracterização química**

Para a identificação dos componentes químicos das amostras, foi realizada análise química quantitativa utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X da marca Philips modelo PW 2400, utilizando como método de preparação das amostras, pastilhas fundidas com fluxo (tetra/metaborato de lítio) no Laboratório de Materiais Avançados – UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro.

#### **4.2.1.3. Caracterização física**

Análise granulométrica das matérias primas

A distribuição de tamanho de partícula das amostras foi realizada pelo método combinado de peneiramento e sedimentação, de acordo com a norma ABNT NBR-7181 (ABNT, 1984c).

O procedimento consistiu basicamente na classificação do tamanho das partículas que ficaram retidas na peneira de 10 mesh (2 mm), por meio de um conjunto de peneiras. As partículas com diâmetro menor que 2 mm, que passam pela peneira de 10 mesh foram classificadas através de um método de combinação por peneiramento usando peneiras de 20, 40, 60, 100 e 200 mesh (peneiramento fino) e sedimentação. A técnica de sedimentação foi realizada com a dispersão de

70 g da amostra em 125 ml de água com a adição de 5,71 g de hexametáfosfato de sódio e 1 g de carbonato de sódio. A solução foi agitada durante 15 minutos e colocada nos tubos de teste. O diâmetro esférico equivalente das partículas foi calculado através da lei de Stokes.

#### 4.2.2. Preparação das massas cerâmicas e dos corpos de prova

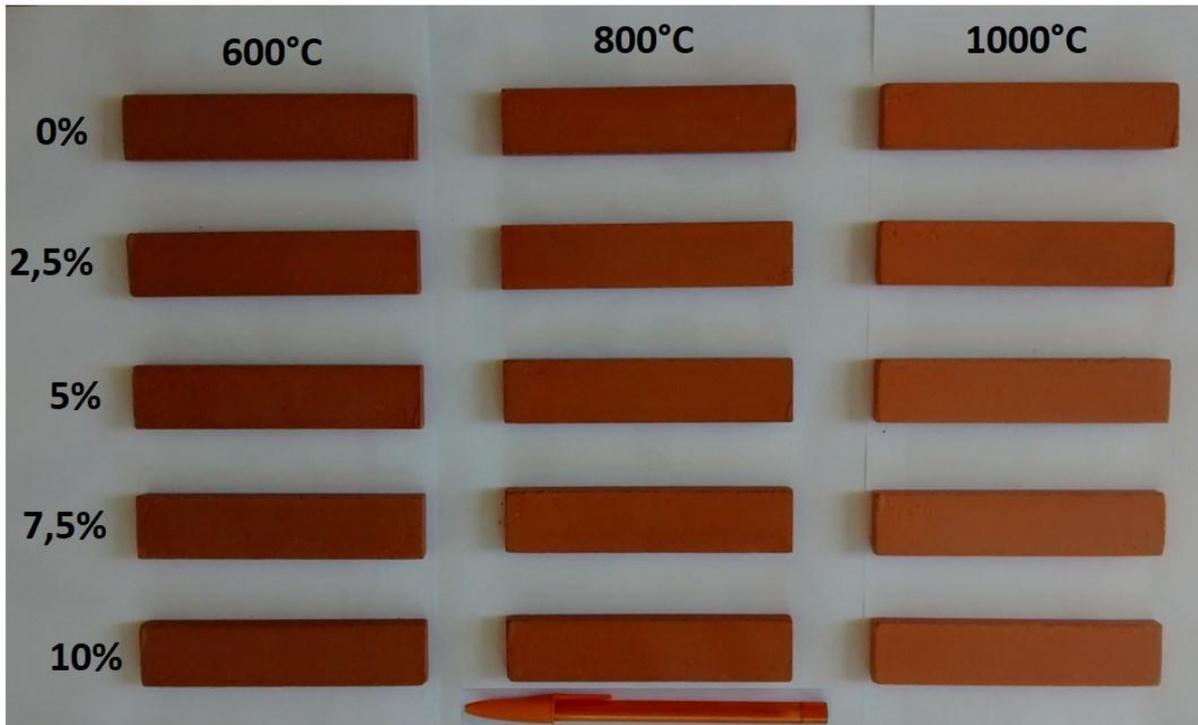
Foram preparadas composições utilizando massa argilosa com adições de 0, 2,5, 5, 7,5 e 10% em peso do lodo amarelo de ETA. A Tabela 4.1 mostra as formulações que foram avaliadas. As formulações foram homogeneizadas a seco em um moinho de bolas.

**Tabela 4.1.** Composição das formulações estudadas.

COMPOSIÇÕES	MASSA ARGILOSA (% EM PESO)	LODO DE ETA (% EM PESO)
1	100,0	0,0
2	97,5	2,5
3	95,0	5,0
4	92,5	7,5
5	90,0	10,0

As composições formuladas foram umedecidas com 8% de água e conformadas por prensagem uniaxial a 20 MPa em matriz de dimensões 114 x 25 mm. Os corpos de prova confeccionados foram secos em estufa a 110°C por 24 horas, posteriormente queimados em temperaturas de 600, 800 e 1000°C em forno laboratorial tipo mufla com taxa de aquecimento de 2°C/min, até atingir a temperatura de patamar, mantida por 180 minutos. O resfriamento foi realizado a uma taxa de 2°C/min até a temperatura ambiente.

A Figura 4.14 apresenta os corpos de prova queimados a 600, 800 e 1000° C das cerâmicas com 0, 2,5, 5, 7,5 e 10% de lodo amarelo de ETA incorporado. Nota-se que as cerâmicas ficaram mais claras à medida que queimadas a temperaturas mais altas.



**Figura 4.14** – Corpos de prova queimados a 600, 800 e 1000° C das cerâmicas com 0, 2,5, 5, 7,5 e 10% de lodo amarelo de ETA incorporado.

### 4.2.3. Ensaio físicos e mecânicos dos corpos de prova

#### 4.2.3.1. Método de Pfefferkorn

Adicionalmente utilizou-se o método de Pfefferkorn para análise da plasticidade com o intuito de se determinar a quantidade de umidade adequada para cada composição estudada.

O método de Pfefferkorn avalia a plasticidade, de uma massa ou de uma argila, medindo o grau de deformação sofrido por um corpo de prova cilíndrico, sujeito à queda de um punção de uma altura constante e com um peso bem definido (1,192 kg). Para esse efeito fazem-se diversos ensaios sobre amostras da mesma massa com diferentes teores de água (RIBEIRO *et al.*, 2003).

O índice de plasticidade de Pfefferkorn corresponde à porcentagem de água contida no corpo de prova cilíndrico submetido a uma compressão igual a 30% de seu nível inicial de altura.

O aparelho de medição consiste em uma haste fixada sobre uma base de suporte que possui uma guia de deslize para uma punção de caída. A distância da queda até o primeiro ponto de contato com o corpo de prova é de 146 mm. No

aparelho há escalas graduadas em que se pode ler o grau de deformação do cilindro ( $a$ ) e a altura após a deformação ( $h_1$ ).

O grau de deformação é uma grandeza adimensional calculada pela seguinte expressão:

$$a = h_0/h_1 \quad (1)$$

Onde  $h_0$  é a altura inicial do corpo de prova (40 mm) e  $h_1$  é altura após a deformação expressa em milímetros.

Por meio de testes práticos Pfefferkorn verificou a possibilidade de dividir o grau de deformação das argilas em três grupos:

- Grupo em que o grau de deformação ( $a$ ) é inferior a 2,5 ( $a < 2,5$ ): a mistura plástica da argila dificilmente poderá ser utilizada por ser demasiadamente seco, o que torna a massa difícil de ser trabalhada.
- Grupo em que o grau de deformação ( $a$ ) se encontra entre os valores 2,5 e 4,0 ( $2,5 < a < 4,0$ ): a argila pertence a uma categoria com características satisfatórias.
- Grupo em que o grau de deformação ( $a$ ) é superior a 4,0 ( $a > 4,0$ ): a argila começa a ser demasiadamente viscosa.

A percentagem de água correspondente a um grau de deformação de 3,3 nos dá o índice de plasticidade de Pfefferkorn, pois este valor trata-se da média entre os valores limites em que argila apresenta características satisfatórias de uma massa plástica (RIBEIRO *et al.*, 2003).

Foram feitos cinco corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 33 mm e 40 mm de altura com diferentes níveis de umidade para cada tipo de argila testada. Após a realização de cada ensaio, cada corpo de prova teve seu peso aferido e foram colocadas em uma estufa a cerca de 110°C por um período de vinte e quatro horas. Após este período de secagem cada corpo de prova foi pesado novamente à temperatura e umidade ambientes.

Com os dados obtidos foi possível plotar gráficos que expressa em seu eixo de ordenadas o percentual de umidade de cada corpo de prova e no eixo das abscissas o grau de deformação ( $a$ ). Com auxílio de um ajuste linear feito por software calculou-se a equação da reta de tendência para cada gráfico e substituiu-se o valor da incógnita “ $x$ ” pelo valor 3,3, o qual fornece o valor em percentual de umidade para

o índice de plasticidade de Pfefferkorn. Estes ensaios foram realizados no LAMAV/UENF.

#### 4.2.3.2. Densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente das peças secas e queimadas foi utilizado o método dimensional, de acordo com a norma ASTM C 373-72 (ASTM, 1977a). A densidade aparente é calculada utilizando a seguinte expressão:

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Onde  $\rho_{ap}$  é a densidade aparente da peça seca ou queimada ( $\text{g/cm}^3$ ); M é a massa (g) e V é o volume ( $\text{cm}^3$ ) dos corpos de prova, secos ou queimados, respectivamente.

#### 4.2.3.3. Retração linear

A retração linear das peças queimadas ( $R_L$ ) foi determinada com o auxílio de um paquímetro digital marca Mitutoyo (resolução  $\pm 0,01$  mm), através da seguinte expressão:

$$R_{Ls} (\%) = \frac{(L_c - L_s)}{L_c} 100 \quad R_{Lq} (\%) = \frac{(L_s - L_q)}{L_s} 100 \quad (3)$$

Onde  $L_c$  e  $L_s$  representam o comprimento do corpo de prova após conformação e secagem, respectivamente, e  $L_q$  após a queima.

#### 4.2.3.4. Tensão de ruptura à flexão

A tensão de ruptura à flexão em três pontos ( $\sigma$ ) foi determinada de acordo com a norma ASTM C674-77 (ASTM, 1977b). Calculada pela seguinte expressão:

$$(\sigma) = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão de ruptura à flexão, (MPa); P é a carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura, (Newton); L é a distância entre os cutelos de

apoio, (mm); b é a largura do corpo de prova, (mm); e d é a espessura do corpo de prova (mm).

#### 4.2.3.5. Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM C373-72. Os corpos de prova foram pesados e em seguida colocados em recipiente com água destilada e mantidos em água fervente por 2 horas, e resfriados submersos em água. Em seguida retira-se a água superficial de cada peça, registrando-se a massa (ASTM, 1977a).

A absorção de água (AA) foi calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$AA(\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} 100 \quad (5)$$

Onde  $P_u$  e  $P_s$  são as massas (g) das peças saturadas em água (úmidas) e secas, respectivamente.

#### 4.2.4. Avaliação Microestrutural

Após a metalização das amostras com uma fina camada de platina, as observações do material queimado foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), em um equipamento da marca Shimadzu, modelo SSX-550, com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) acoplado, do LAMAV-UENF. Já as análises de microscopia ótica (MO) foram realizadas em um microscópio MOTIC Agar-Scientific, do LAMAV-UENF.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

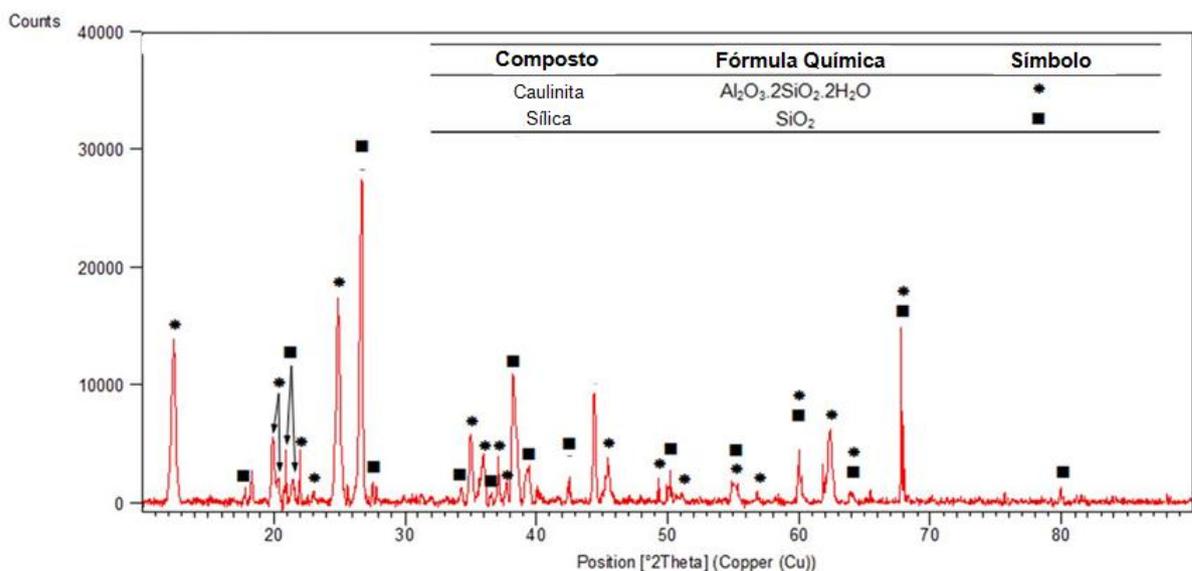
### 5.1. Caracterizações das matérias-primas

#### 5.1.1. Caracterização mineralógica

##### *Difratometria de raios X das matérias-primas*

A Figura 5.1 apresenta o difratograma de raios X do lodo amarelo de ETA, onde há picos de difração predominantes de caulinita -  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e do quartzo -  $\text{SiO}_2$ . As composições mineralógicas do lodo de ETA confirmaram similaridade a outros lodos provenientes de outras ETA's principalmente com predominância de argilominerais e quartzo (SANTOS *et al.* 2000, KLEIN, 2002; OLIVEIRA *et al.* 2004, FERRANTI e GEHLING 2005, MARGEM *et al.* 2006, WOLFF *et al.* 2007, SOUZA *et al.* 2008, MARGEM, 2008; MONTEIRO *et al.*, 2008, VITORINO *et al.* (2009), TARTARI *et al.* 2011, RODRIGUES *et al.* 2013, entre outros.

De acordo com esta constituição mineralógica, o resíduo investigado pode até apresentar plasticidade em mistura com água, dependendo basicamente da quantidade de caulinita presente.



**Figura 5.1** – Difratograma de raios X do lodo amarelo de ETA.

A Figura 5.2 apresenta o difratograma de raios-X da argila. Pode ser observado que os picos de difração predominantes são correspondentes à caulinita -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  e ao quartzo -  $(\text{SiO}_2)$ . Outros minerais identificados foram a mica muscovita -  $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ , goetita -  $(\text{FeO}(\text{OH}))$ , gibsite -  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e a montmorilonita -  $(\text{Mg}, \text{Ca})\text{O}.\text{Al}_2\text{O}_3\text{Si}_5\text{O}_{10}.n\text{H}_2\text{O}$ .

Segundo ABAJO (2000), a caulinita é o mineral responsável por proporcionar o desenvolvimento da plasticidade da argila em mistura com água, e apresenta um maior tamanho de partícula em comparação com outras classes de argilominerais. Temperaturas máximas da ordem de  $1200^\circ\text{C}$  a  $1350^\circ\text{C}$  são consideradas normais para estas argilas, em aplicações específicas de materiais refratários e porcelanas.

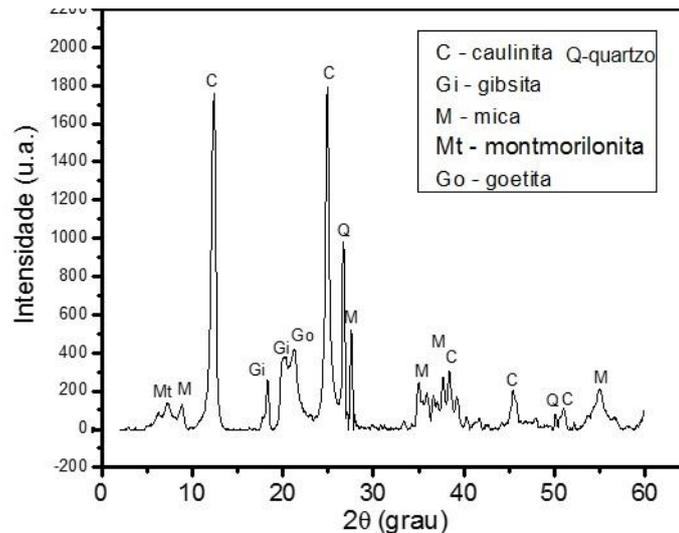
As argilas caulínicas, são predominantes em Campos dos Goytacazes (VIEIRA e MONTEIRO, 2004; VIEIRA *et al.*, 2005), se caracterizam por apresentarem um comportamento de queima refratário.

Segundo FACINCANI (1993), o quartzo é um mineral comumente presente nas argilas. Embora o quartzo tenha efeito benéfico para o processamento da cerâmica, geralmente ocorre também um comprometimento da resistência mecânica devido à sua transformação alotrópica a  $\sim 573^\circ\text{C}$ . O quartzo se constitui na principal impureza presente.

A gibsite contribui para o aumento da refratariedade das argilas e da perda de massa durante a queima. Portanto, sua presença é indesejável.

A mica muscovita é um mineral com textura lamelar que pode ocasionar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas. Desde que apresente tamanho de partícula reduzido, a mica muscovita pode atuar como fundente devido à presença de óxidos alcalinos como  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  (VIEIRA, *et al.* 2008).

Na argila estudada foram identificados picos de difração de baixa intensidade com  $2\theta$  de 6,3 e 7,2 graus, o que indica traços de montmorilonita nas argilas da região. A montmorilonita é um argilomineral altamente plástico e que apresenta uma grande tendência de re-hidratação, o que pode acarretar problemas de processamento.



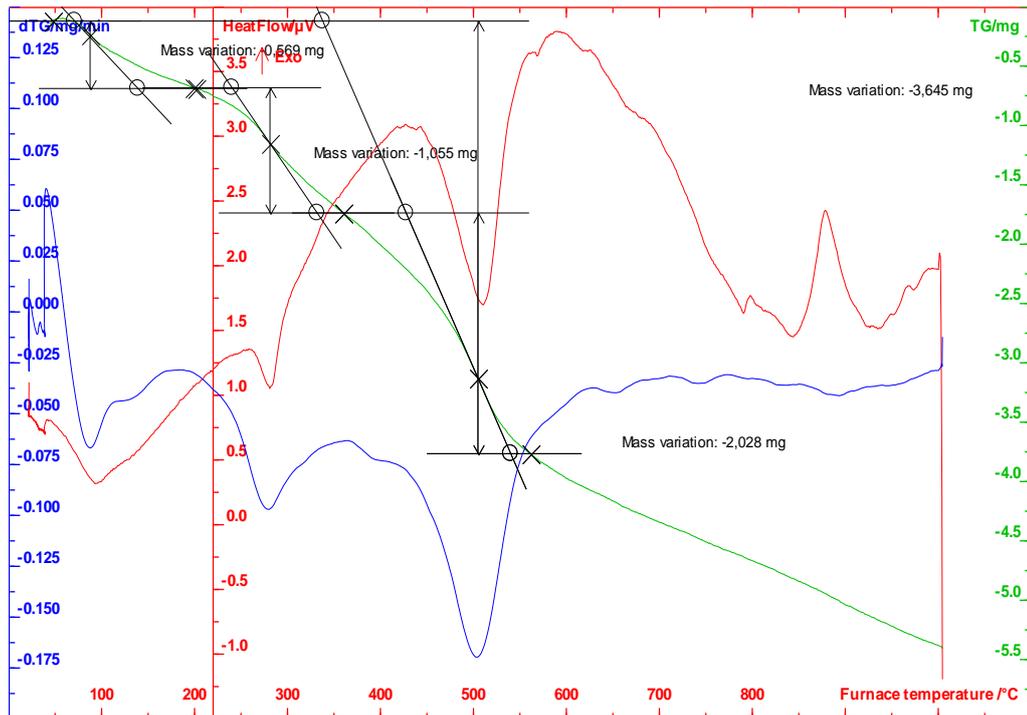
**Figura 5.2** – Difratoograma de raios X da argila.

#### *Análise termogravimétrica do lodo de ETA*

A análise termogravimétrica possibilita o estudo do comportamento das matérias-primas quando são submetidas ao aquecimento, e também, possibilita a complementação da caracterização mineralógica desses materiais por DRX.

A Figura 5.3 apresenta a análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (DTA), do lodo de ETA. Nota-se que a 100°C ocorreu à perda de umidade; nas temperaturas 270 - 300°C incidiu um processo de volatilização de compostos orgânicos; dentre 450 - 650°C ocorreu à desidratação da caulinita passando à fase amorfa, metacaulinita. Em meio às temperaturas de 850 - 930°C ocorreu a transformação alotrópica (massa invariante representada na curva azul), Quartzo  $\beta \rightarrow$  Tridmita  $\beta_2$ ; os resultados da perda de massa (perda ao fogo) são concordantes com os resultados de Análise Química (15,8%) e não há picos exotérmicos de oxidação pois a atmosfera do experimento é de argônio.

Os resultados de perda ao fogo do lodo de ETA em outros trabalhos (Tabela 3.3) mostraram uma grande variação, de 14,50 SOUZA *et al.* (2008) a 57,73% MARGEM *at al.* (2006). Embora o valor de perda ao fogo do lodo investigado, 15,80%, esteja entre os mais baixos encontrados na literatura, a perda de massa que o lodo vai apresentar durante a queima da cerâmica acarretará porosidade e eventualmente pode contribuir para o aumento da retração.



**Figura 5.3** – Curvas TG/DTA do lodo amarelo de ETA.

Segundo VIEIRA e MONTEIRO (2003) a perda de massa típica de corpos cerâmicos de boa qualidade deve situar-se entre 5 e 7%, no entanto, os valores bem superiores apresentados pelas argilas de Campos dos Goytacazes, são características desta matéria prima e constitui um dos principais fatores que conferem à cerâmica, após queima, elevada porosidade.

### 5.1.2. Caracterização química

A Tabela 5.1 apresenta a composição química obtida por Fluorescência de raios-X (FRX) das duas matérias primas básicas: lodo amarelo e argila. Nesta tabela nota-se a predominância de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{FeO}_3$ ) tanto na argila, quanto no lodo. Isto está relacionado com a composição mineralógica semelhante de ambos os materiais investigados. Além disso, a elevada perda ao fogo e o baixo teor de óxidos fundentes, tais como  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$  é típico de materiais à base de caulinita (VIEIRA *et al.* 2008).

Em vários trabalhos de caracterização química já realizados, tanto da argila (Vieira, 2001) quanto do lodo (compilação de dados, Tabela 3.3), mostraram que os resultados obtidos estão alinhados com outros trabalhos.

A perda ao fogo da argila ocorre devido à perda de água de constituição dos argilominerais, desidratação de hidróxidos, oxidação de matéria orgânica e decomposição de carbonatos (HENRIQUE, 2013).

Os autores (VIEIRA *et al.* 2005; MONTEIRO *et al.* 2008) destacaram que a perda ao fogo do lodo, é atribuída principalmente à combustão de matéria orgânica e que a alta perda ao fogo pode ser uma desvantagem durante a fase de queima do processo de produção da cerâmica, podendo aumentar a porosidade e consequentemente a absorção de água e diminuir a resistência mecânica.

Cabe ressaltar que o conteúdo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  relativamente alto é responsável pela cor vermelha da cerâmica após a queima.

Quanto à composição química da massa cerâmica e do lodo amarelo de ETA, a Tabela 5.1 mostra constituição semelhante, ou seja, predominância de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

**Tabela 5.1** - Composição química das matéria primas estudadas (% em peso).

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{MnO}$	PF
MASSA CERÂMICA (%)	43,59	25,64	10,38	1,63	1,55	0,66	0,15	0,25	0,11	15,20
LODO AMARELO DE ECA (%)	37,60	27,60	12,00	1,44	1,00	0,76	0,28	0,07	—	15,80

### 5.1.3. Caracterização física

#### *Análise granulométrica das matérias primas*

A Figura 5.4 apresenta a distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas. As diferentes faixas de tamanho de partícula estão associadas à fração argila, silte e areia fina e areia grossa, de acordo com classificação granulométrica dos solos da International Society of Soil Science (SANTOS 1989 *apud* VIEIRA e PINHEIRO 2011). A argila apresenta maior percentual (56,2%) de partículas com diâmetro esférico equivalente  $< 2 \mu\text{m}$ , as quais estão associadas predominantemente aos argilominerais, o que caracteriza a chamada "fração-argila", já as frações silte e areia fina e areia grossa apresentam valores de 28,3%, 9,0% e 6,5%, respectivamente.

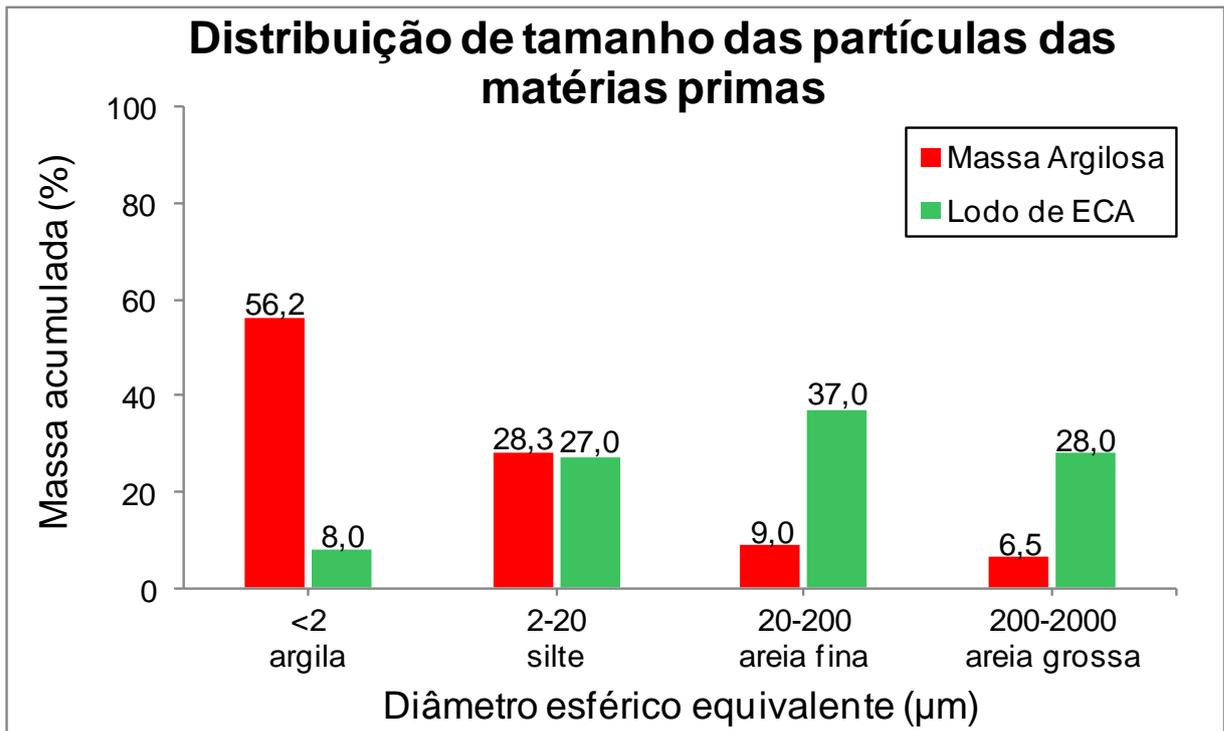
Já para o lodo de ETA este percentual da fração argila é de 8,0%. Neste caso, o lodo de ETA é uma matéria prima que deve apresentar efeito desplastificante, conforme será comprovado mais adiante. As frações “silte”, “areia fina” e “areia grossa” da massa apresentaram valores de 27, 37% e 28%, respectivamente.

As partículas maiores do lodo amarelo, em comparação com a argila, não contribui para um processo de sinterização eficaz e, portanto, resulta na porosidade, o que prejudica tanto a absorção de água quanto a resistência mecânica (MONTEIRO *et al.* 2008).

O lodo da ETA de Cubatão analisado por (SANTOS *et al.*, 2001 *apud* MARGEM 2008) apresentou frações de silte e areia acima 60%, o que conferiu valores de plasticidade inferiores, aos valores de plasticidade observados no lodo de decantador da ETA de Itaperuna. Estes resultados demonstraram que os lodos podem apresentar variações nas características, podendo interferir de modo diferente no processo produtivo da cerâmica (MARGEM 2008).

CARTY e SENEPATI (1998) ressaltaram que partículas de areia, sobretudo, as de tamanho grosseiro são problemáticas para a etapa de queima da cerâmica devido ao risco de aparecimento de trincas causadas pela transformação alotrópica do quartzo em temperaturas da ordem de 570 °C, acarretando redução da resistência mecânica das peças.

Por outro lado, a presença de areia é importante para ajustar a plasticidade/trabalhabilidade da argila e para reduzir a retração de secagem e queima. O percentual de areia presente em massa de cerâmica vermelha normalmente situa-se aproximadamente entre 15 a 30% (FACINCANI, 2002).



**Figura 5.4** – Análise granulométrica do lodo amarelo de ETA e da massa cerâmica.

Uma das ferramentas utilizadas para orientar no estudo da composição da granulometria de massas cerâmicas é o diagrama de Winkler, como demonstrado na Figura 5.5. Este diagrama permite a recomendação para fabricação de determinados tipos de produtos de cerâmica vermelha, assim como possibilita proceder aos ajustes necessários de uma composição granulométrica dosando-se adequadamente grãos finos, médios e grossos (PRACIDELLI e MELCHIADES 1997, VIEIRA *et al.* 2005).

Nesta figura é possível observar que tanto a argila quanto o lodo de ETA, de acordo com o diagrama de Winkler (PRACIDELLI, 1997), encontra-se fora da região apropriada para a fabricação de materiais de qualidade com dificuldade de produção (A), telhas, capas (B), tijolos furados (C) e tijolos maciços (D). A massa cerâmica é uma massa monocomponente e o lodo amarelo de ETA um silte arenoso, quanto à sua plasticidade, possui a característica de um material semelhante às argilas do tipo "magra", ou seja, um material rico em quartzo (silte) e areia. Este resultado mostra que incorporações de elevada quantidade de lodo de ETA na massa cerâmica investigada vai prejudicar sua trabalhabilidade.

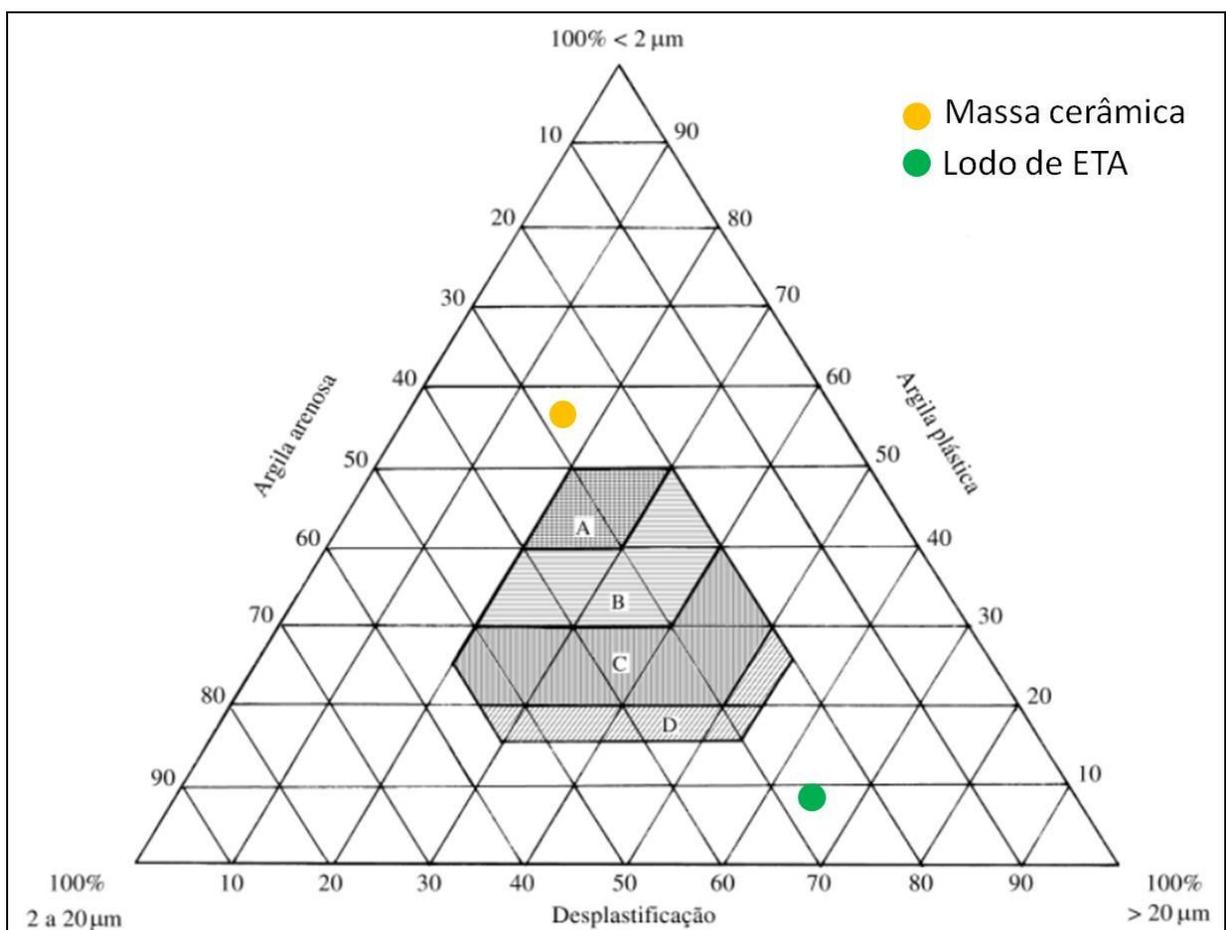
Sozinho, não pode ser utilizado para a produção de blocos cerâmicos, pois geram produtos frágeis e porosos, mas pode ser misturado, em pequenas

quantidades, com argilas plásticas, de granulometria fina, para a fabricação de blocos cerâmicos de boa qualidade, pois atua como um agente redutor de plasticidade.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as composições granulométricas dos produtos, de acordo com o diagrama de Winkler (PRACIDELLI, 1997).

**Tabela 5.2** - Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha.

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



**Figura 5.5** – Diagrama de Winkler com a localização das matérias primas.

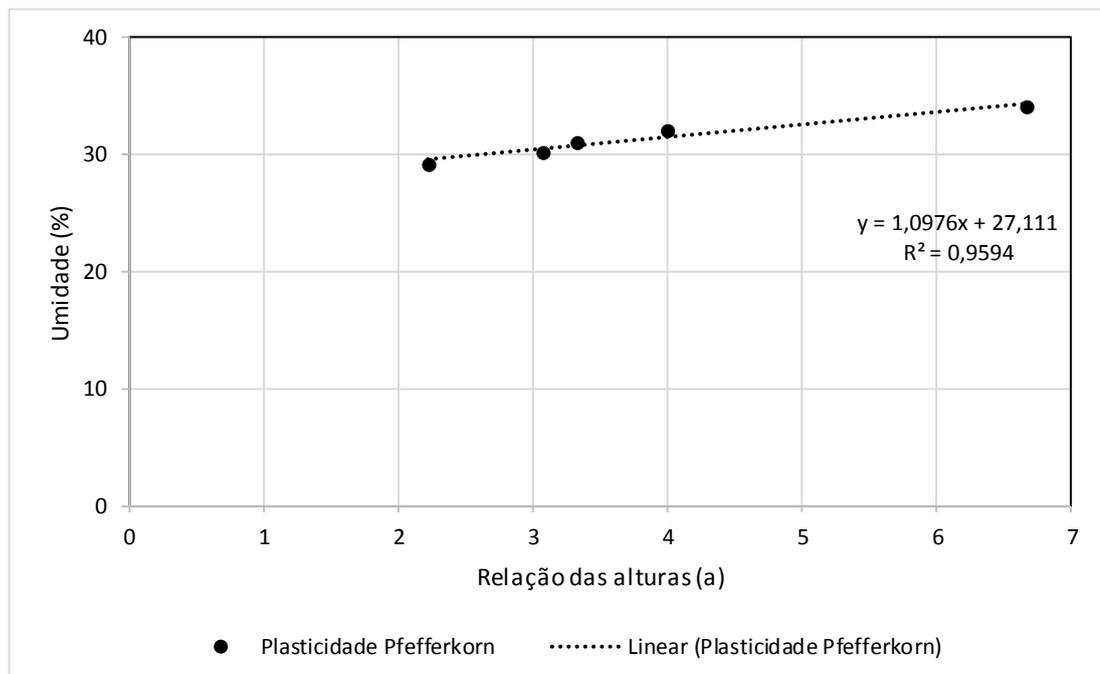
## 5.2. Propriedades físicas e mecânicas

### 5.2.1. Plasticidade de Pfefferkorn

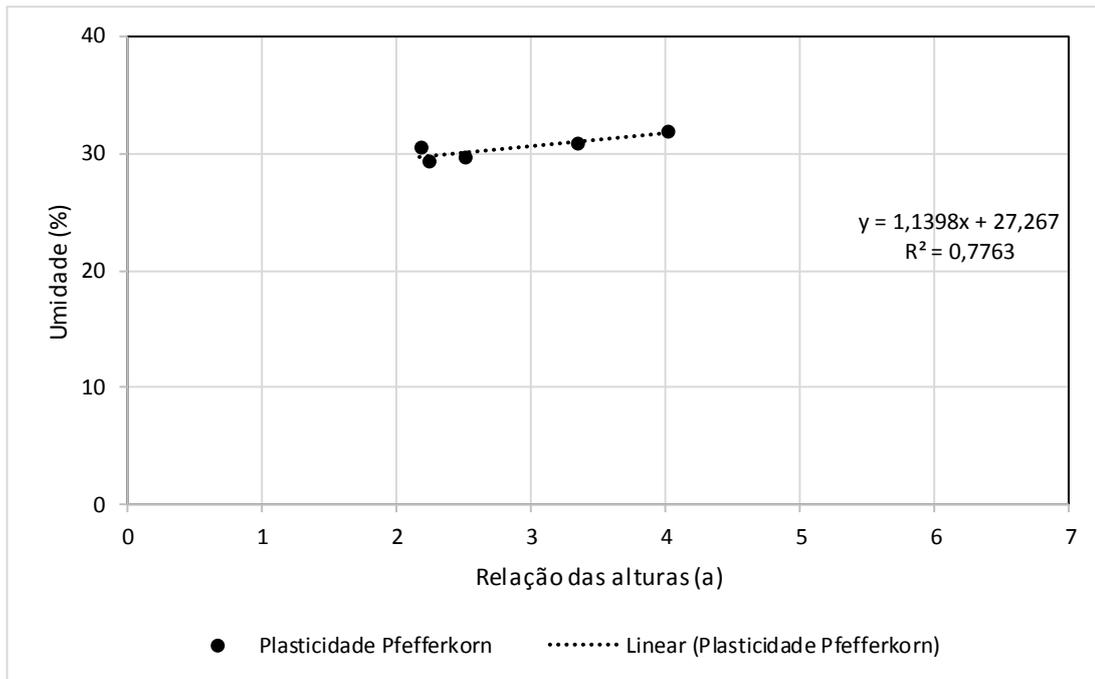
Os resultados desse ensaio foram expressos em forma de gráfico, onde o eixo das abscissas é a relação das alturas (a) e o eixo das ordenadas é a umidade percentual (%). A seguir, os gráficos obtidos para a argila incorporada com 0 e 10% em peso de lodo de ETA.

Em cada gráfico foi utilizada uma linha de tendência linear a fim de se obter a equação do gráfico, essa equação tem como função calcular o valor exato do índice de plasticidade Pfefferkorn, que é indicado na ordenada do gráfico (percentual de umidade) quando a abscissa (relação das alturas (a)) tem valor igual a 3,3.

A partir das equações de ajuste linear dos gráficos apresentados nas Figuras 5.6 e 5.7 foram obtidos os seguintes resultados para os índices de plasticidade de Pfefferkorn ao substituir “x” pelo valor 3,3 como relação das alturas: 30,09% para a composição 0% e 31,00% para a composição 10% de lodo de ETA. No geral é possível observar que, com adição de 10% de lodo de ETA houve uma pequena redução no percentual de umidade, apresentando efeito desplastificante.



**Figura 5.6** – Determinação do índice de plasticidade de Pfefferkorn da composição 0%.

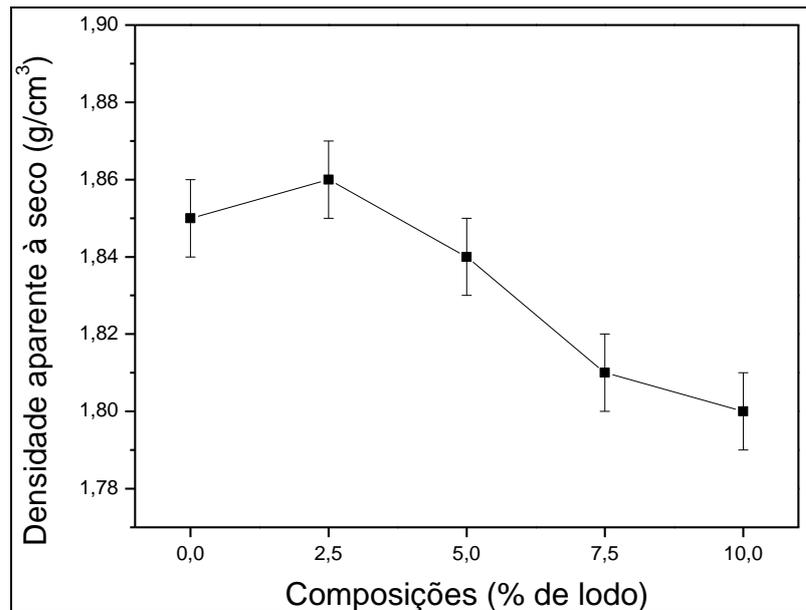


**Figura 5.7** – Determinação do índice de plasticidade de Pfefferkorn da composição 10%.

### 5.2.2. Densidade aparente

A Figura 5.8 apresenta o efeito da adição de lodo amarelo de ETA na densidade aparente das cerâmicas, onde pode ser observada uma tendência de redução da densidade à medida que aumenta o percentual de lodo. Estes resultados são concordantes com MARGEM, 2008.

Esta propriedade é de grande importância tecnológica, pois indica o grau de empacotamento das partículas. Sendo importante ressaltar que uma elevada densidade a seco é favorável aos processos de sinterização, em contrapartida, pode ser prejudicial à prévia de secagem e na eliminação de matéria orgânica nas temperaturas iniciais de queima, devido à redução da permeabilidade das peças cerâmicas podendo causar trincas.



**Figura 5.8** – Densidade aparente a seco das composições.

### 5.2.3. Retração linear

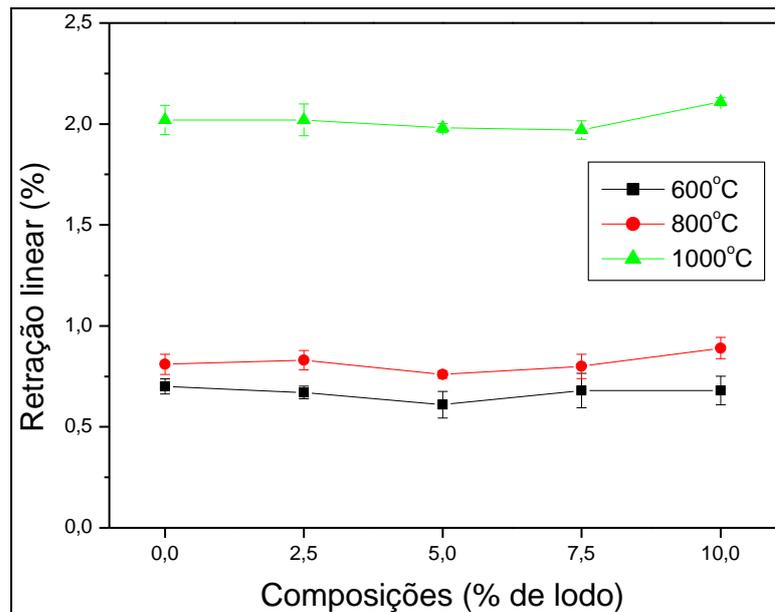
A retração linear de queima depende fundamentalmente da densidade aparente da peça prensada, da composição da massa e das condições de queima.

A Figura 5.9 mostra que a retração linear aumentou com as temperaturas de queima (600, 800 e 1000°C) como resultado do aumento do grau de sinterização das massas cerâmicas. Na temperatura de 1000°C houve um acréscimo significativo na retração linear em comparação com as demais.

Os resultados mostram que a retração linear da massa cerâmica aumenta com o incremento da temperatura e praticamente não se altera com o incremento na quantidade de lodo incorporada, como também observado por (OLIVEIRA, 2004 e MARGEM, 2008) em lodo de ETA.

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 o 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 da peça TALLINI JUNIOR, 2009.

Cabe ressaltar que a 1000°C e a 800°C houve um pequeno incremento na retração linear da massa argilosa pura com 10% de incorporação do lodo.



**Figura 5.9** – Retração linear de queima das cerâmicas.

#### 5.2.4. Tensão de ruptura à flexão

A Figura 5.10 mostra a tensão de ruptura à flexão da massa de cerâmica em função do percentual de lodo amarelo de ETA incorporado e da temperatura de queima.

É possível observar que nas temperaturas de 600 e 1000°C com a incorporação de 0 a 5% não há modificação na resistência mecânica e que com 7,5 e 10% diminui a resistência, já a 800°C de 0 a 7,5% também não há alteração e com 10% tende a reduzir a resistência.

Isso ocorre devido a incorporação elevada do lodo amarelo de ETA, que prejudica a resistência mecânica da cerâmica em função da porosidade e da elevada perda de massa, estes resultados estão de acordo com CASTRO (2010) onde o autor observou que com o aumento da incorporação de lodo houve uma tendência de redução dos valores da resistência à compressão, este comportamento foi associado ao aumento da porosidade formada na queima dos blocos cerâmicos, devido principalmente à volatilização da matéria orgânica e da água durante o processo de queima.

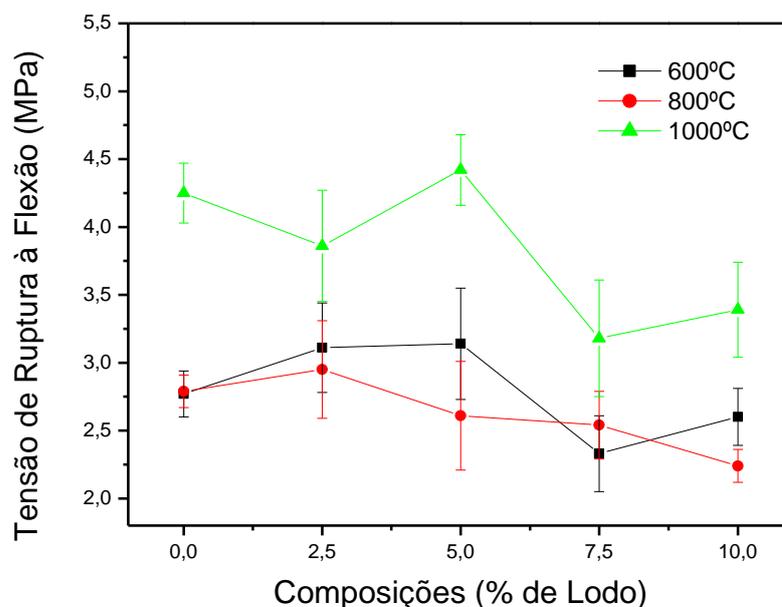
Com relação à temperatura de queima, é possível observar que praticamente não ocorreu alteração na resistência mecânica de todas as composições

investigadas nas temperaturas de 600 a 800°C. Já a 1000°C nota-se um incremento significativo da resistência mecânica para todas as composições investigadas.

Este resultado está atribuído ao efeito que a temperatura exerce na consolidação das partículas. De acordo com PINHEIRO E HOLADA (2010) existe uma correlação do aumento da resistência mecânica com concomitante redução da absorção de água (porosidade aberta) com o aumento da temperatura de queima.

A autora OLIVEIRA (2004), não observou alteração na tensão de ruptura à flexão em corpos de prova com até 15% de lodo de ETA de Campos dos Goytacazes queimados a 850, 950 e 1050°C.

MARGEM (2008) descreveu no seu estudo que as propriedades tecnológicas são influenciadas, onde a adição de até 10% do lodo de ETA em peso ocasiona um incremento da absorção de água e redução da tensão de ruptura à flexão da massa cerâmica argilosa em todas as temperaturas investigadas (700, 900 e 1100°C).



**Figura 5.10** – Tensão de ruptura à flexão das cerâmicas.

### 5.2.5. Absorção de água

A absorção de água é outro parâmetro analisado em ensaios cerâmicos, e é uma propriedade física que está associada à porosidade.

Na Figura 5.11 são apresentados os valores de absorção de água das cerâmicas incorporadas com lodo amarelo de ETA.

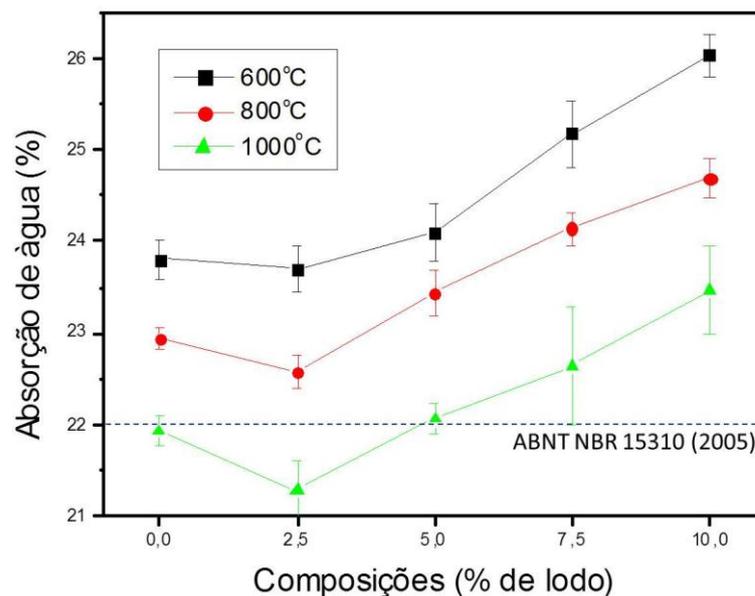
Os resultados mostram que os valores de absorção de água das cerâmicas são fortemente influenciados pela adição do lodo. Com a incorporação de 2,5% do lodo

na cerâmica, queimada a temperatura de 1000°C, observa-se que a absorção diminui, no entanto em escala laboratorial as composições de 0 e 2,5% mantiveram-se no limite de 22% para blocos de vedação de acordo com a ABNT NBR 15310 (2005). A cerâmica com 5% de lodo também está dentro da norma, mais a temperatura a 1000°C está muito elevada para fazer blocos de vedação.

O aumento da absorção pode ser explicado pelo acréscimo do índice de vazios (porosidade), bem como a maior perda ao fogo e menor empacotamento.

Também é possível observar que teve uma redução da absorção de água para todas as composições com o aumento da temperatura. Estes resultados estão alinhados com MARGEM, 2008. No entanto, OLIVEIRA (2004) não observou alteração na absorção de água em corpos de prova com até 15% de lodo de ETA de Campos dos Goytacazes queimados a 850, 950 e 1050°C.

Estes resultados também mostram que a temperatura de queima exerce uma significativa influência nas propriedades da cerâmica. Com o aumento da temperatura ocorre consolidação das partículas e redução da porosidade, em particular, na temperatura de 1000° C. Isto é consequência dos processos de sinterização envolvendo, sobretudo, formação de fase líquida (ABNT, 1984).



**Figura 5.11** – Absorção de água das cerâmicas.

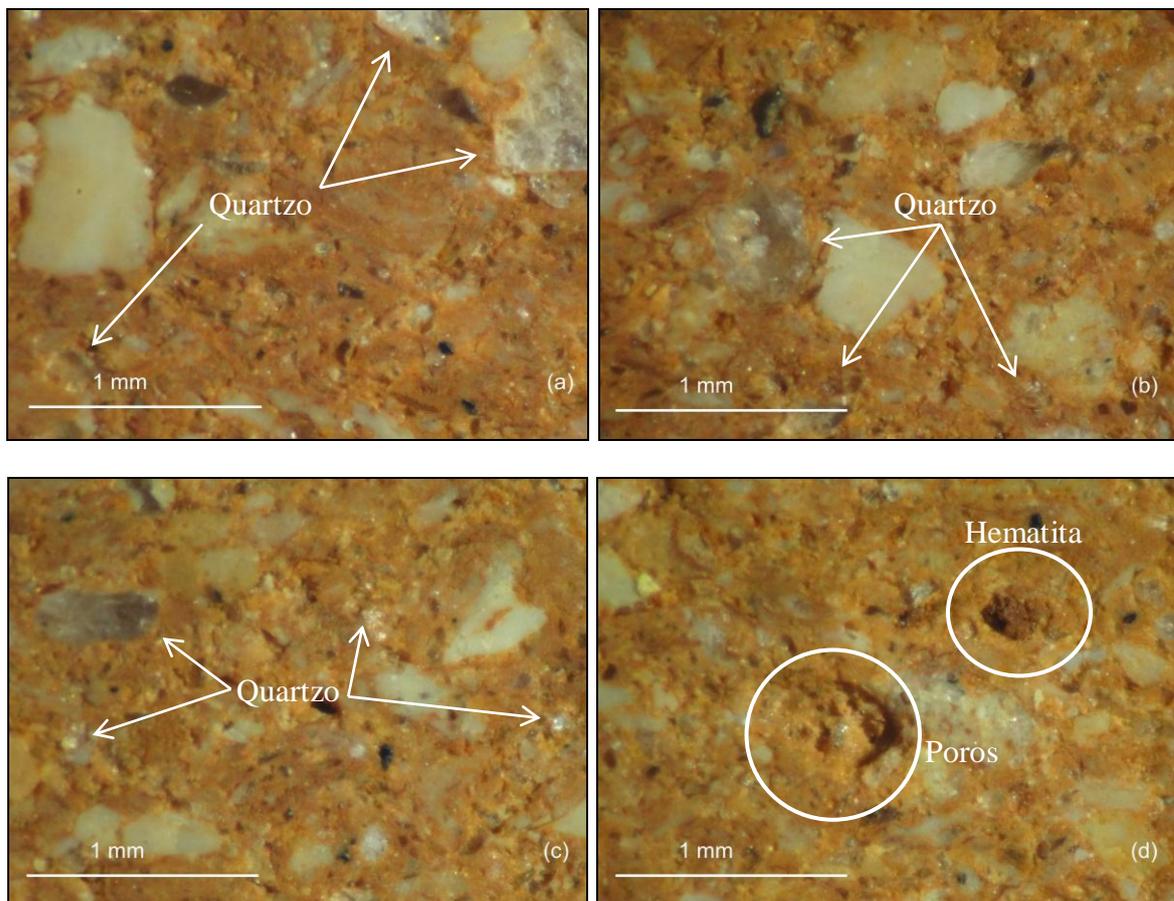
### 5.3. Avaliação Microestrutural

#### Microscopia ótica

A análise microestrutural dos corpos cerâmicos estudados contribui para o maior entendimento do comportamento das suas propriedades em função da adição do lodo de ETA.

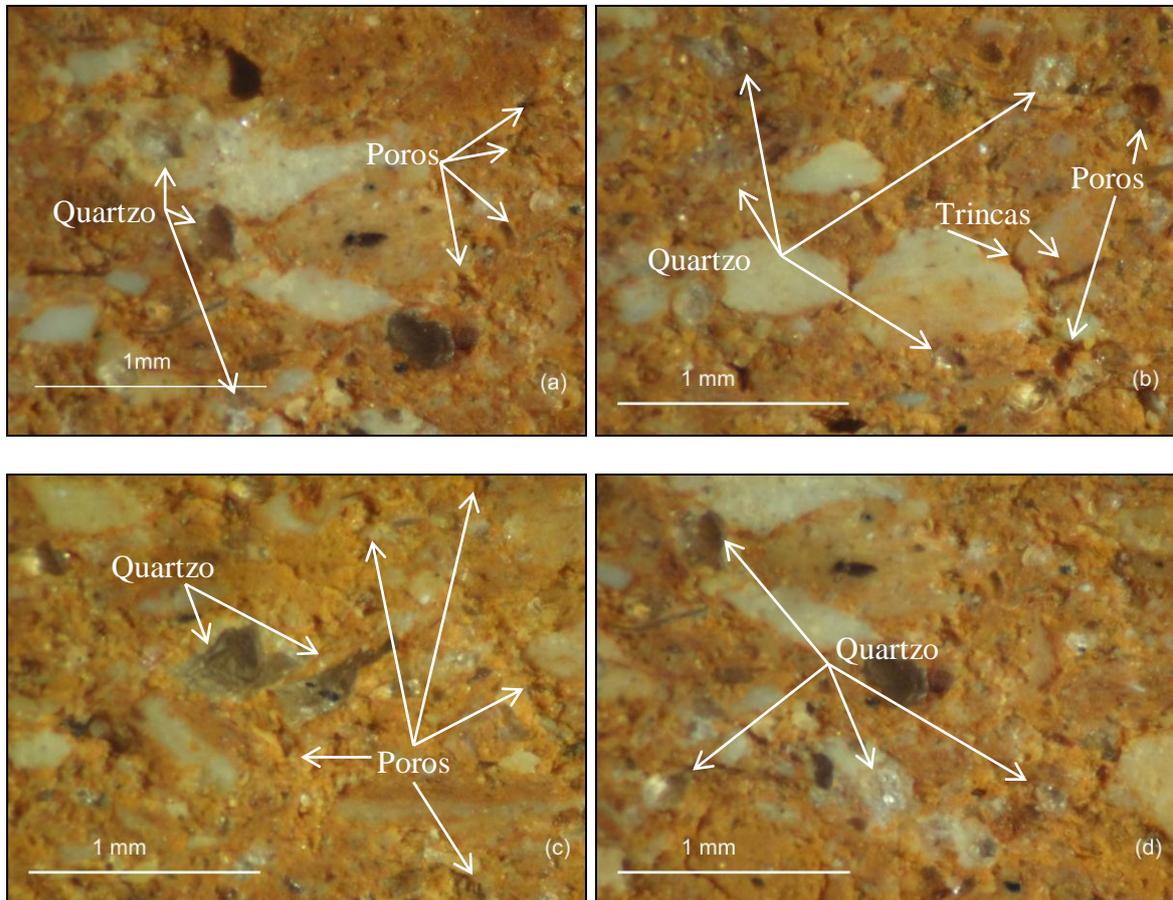
As Figuras abaixo apresentam as micrografias obtidas por microscopia ótica, da superfície dos corpos de prova cerâmicos queimados a 1000°C, sendo a Figura 5.12 sem a incorporação de resíduo de ETA e a Figura 5.13 com 10% de lodo de ETA.

Tanto a cerâmica pura, quanto com 10% de lodo amarelo de ETA, foi possível identificar grande quantidade de quartzo. Isso está relacionado com o alto teor de partículas de quartzo livre ( $\text{SiO}_2$ ) encontrado nas argilas, sendo a principal impureza presente. Também é possível observar hematita (partícula avermelhada) e poros superficiais.



**Figura 5.12** – Micrografias de microscopia ótica (MO) das cerâmicas com 0% de lodo amarelo de ETA queimada a 1000°C.

Na Figura 5.13 é possível notar o aumento na porosidade e o aparecimento de trincas. Neste caso a incorporação de 10% de resíduo provocou maior concentração de pontos com defeitos e aumento da porosidade, corroborando a tendência de queda dos valores de resistência mecânica e maior absorção de água.



**Figura 5.13** – Micrografias de microscopia ótica (MO) das cerâmicas com 10% de lodo amarelo de ETA queimadas a 1000°C.

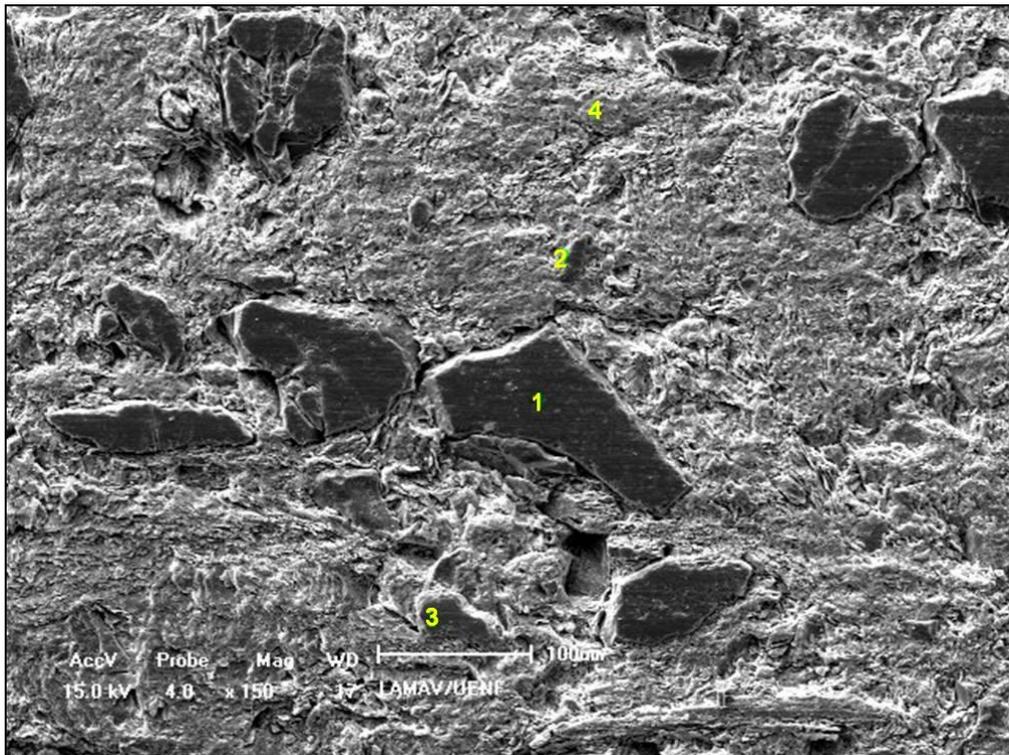
#### Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Nesse tópico serão apresentadas as fotomicrografias das cerâmicas sinterizadas a 1000°C sem a adição de lodo e com a adição de 10% de lodo amarelo de ETA. As imagens apresentam um aumento de 150x.

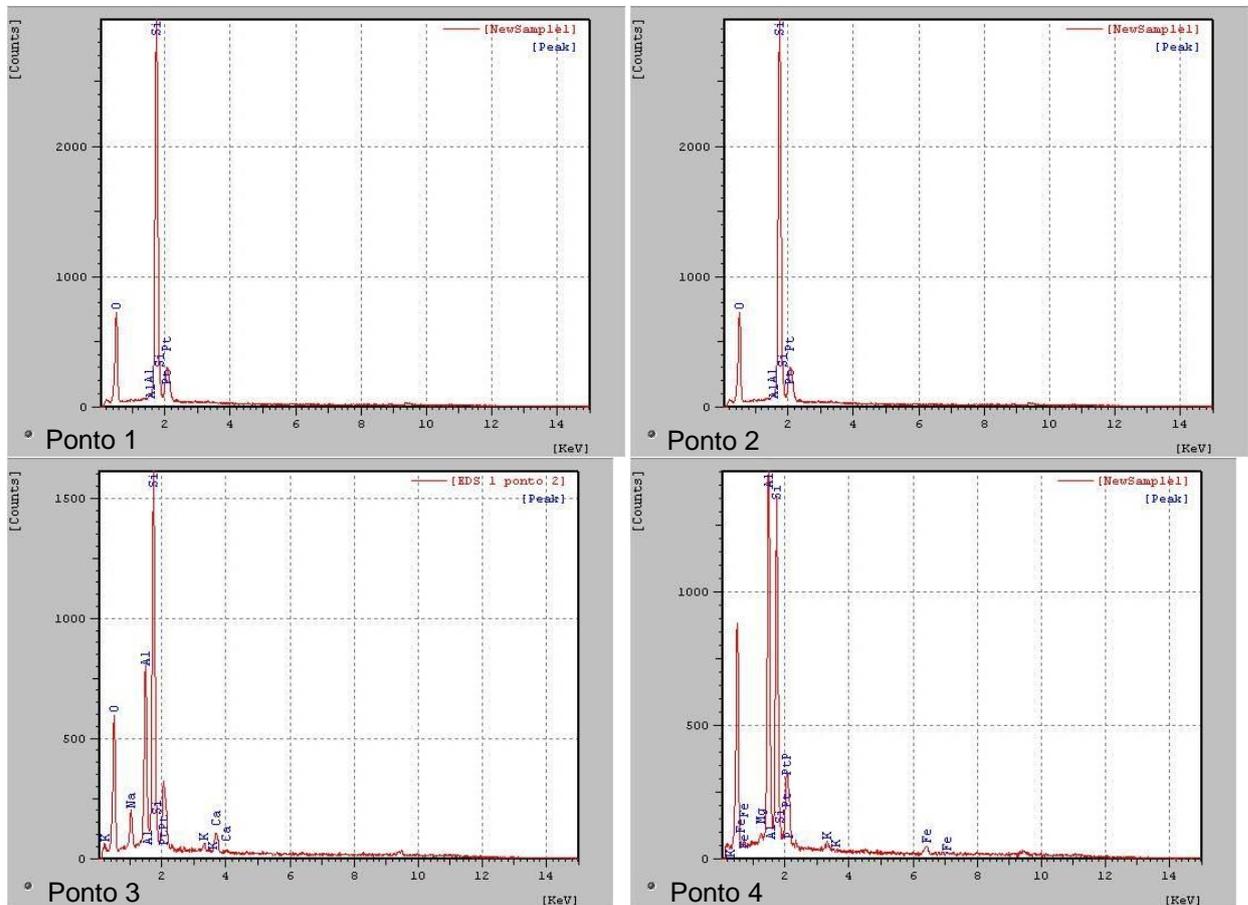
A Figura 5.14 ilustra uma micrografia de MEV a 1000°C com 0% de lodo de ETA e a figura 5.15 mostra os espectros de EDS correspondentes aos pontos de 1 a 4. Pode ser observado a presença de minerais que compõe o quartzo e a hematita como foi observado nas micrografias de microscopia ótica (Figura 5.12) das

cerâmicas com 0% lodo amarelo de ETA queimado a 1000°C. Onde o quartzo é composto por  $\text{SiO}_2$  e a hematita composta por  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

A Figura 5.15 apresenta a microscopia com análise pontual da cerâmica de Campos sem a adição de resíduo. Observa-se nos espectros de EDS a predominância de picos de silício e alumínio nas quatro regiões numeradas. Estas regiões estão associadas com a matriz de aluminossilicatos como a caulinita e/ou mica. A presença de platina (Pt) no material se deve a metalização do mesmo com platina.

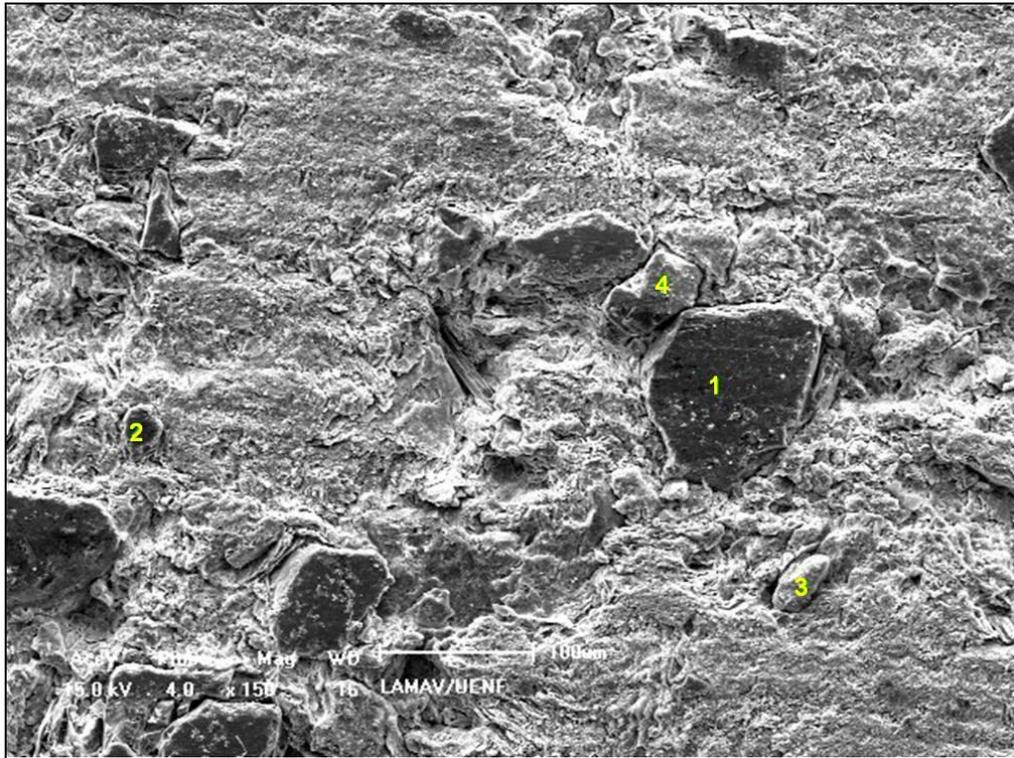


**Figura 5.14** – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) a 1000°C com 0% de lodo de ETA.

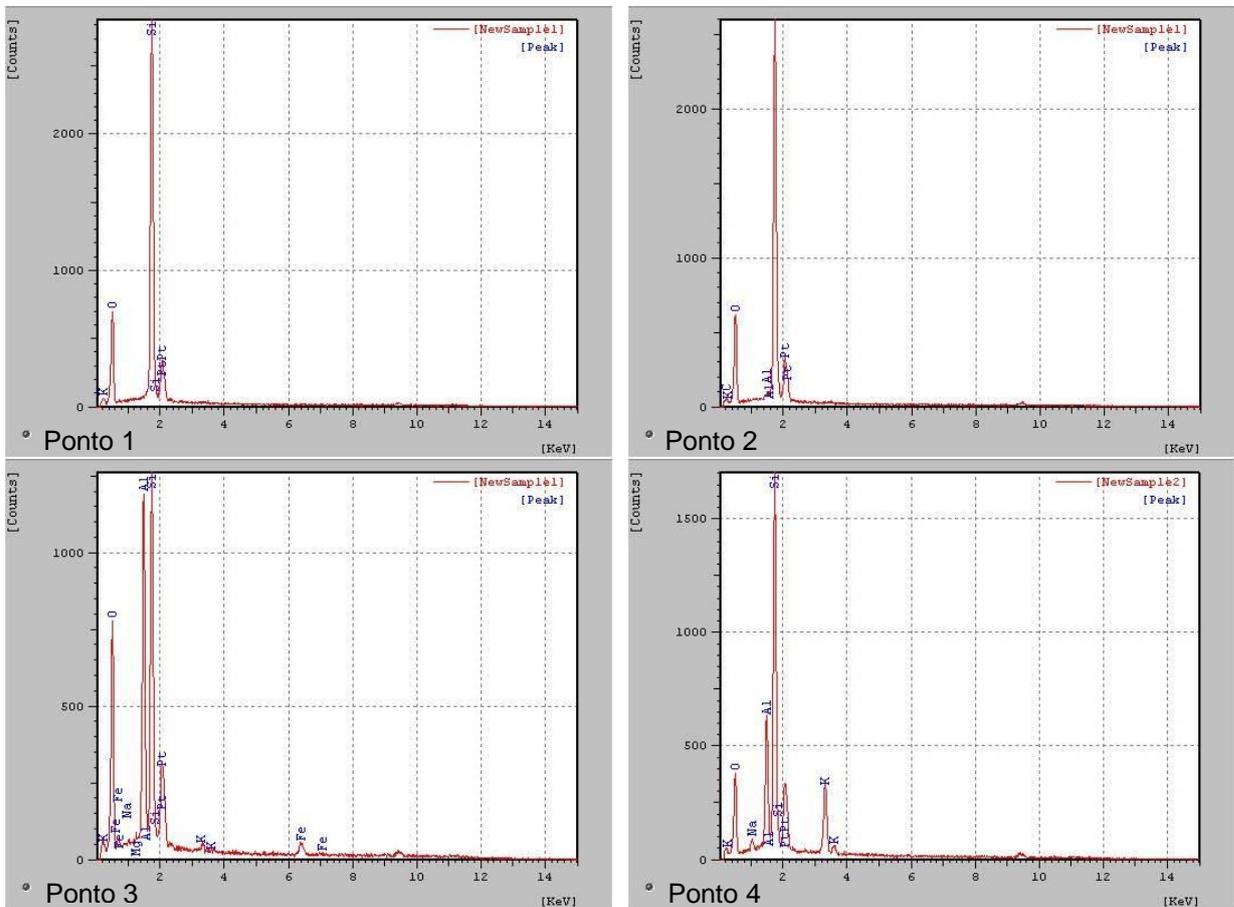


**Figura 5.15** – Espectros de EDS correspondente aos pontos 1, 2, 3 e 4 do (MEV) a 1000°C com 0% de lodo de ETA.

A Figura 5.16 apresenta uma micrografia a 1000°C com 10% de lodo de ETA, onde é possível observar uma microestrutura menos densa e com maior quantidade de defeitos que na micrografia com 0% de lodo, como visto na figura 5.13. A Figura 5.17 mostra os espectros de EDS correspondentes aos pontos de 1 a 4, onde também foi observado nos espectros de EDS a predominância de picos de silício e alumínio nas quatro regiões numeradas.



**Figura 5.16** – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) a 1000°C com 10% de lodo de ETA.



**Figura 5.17** – Espectros de EDS correspondente aos pontos 1, 2, 3 e 4 do (MEV) a 1000°C com 10% de lodo de ETA.

## 6. CONCLUSÕES

Diante do que foi exposto nesse trabalho, conclui-se:

- Tanto a argila, quanto o lodo amarelo de ECA basicamente são constituídos por caulinita e quartzo, no entanto a argila apresentou tamanho de partícula (56,2%) concentradas na “fração-argila” e o lodo (65%) na fração areia
- Tanto a argila estudada, quanto o lodo de ECA, de acordo com o diagrama de winkler apresentaram-se fora da região apropriada estabelecida pelo diagrama. Entretanto, a incorporação do lodo ajusta a granulometria da argila para a fabricação de produtos de cerâmica vermelha.
- O índice de plasticidade Pfefferkorn foi 30,09% para a composição 0% e 31,00% para a composição 10% de lodo de ECA. No geral, o lodo de ECA, nos percentuais investigados, não alterou a plasticidade da argila.
- Incorporações de lodo acima de 2,5% prejudicaram o empacotamento da massa argilosa, ou seja, diminuíram a densidade aparente a seco.
- A temperatura de queima exerceu uma significativa influência nas propriedades investigadas, aumentando a retração linear e a tensão de ruptura à flexão, bem como reduzindo a absorção de água das composições.
- O lodo de ECA praticamente não alterou a retração linear da massa argilosa das temperaturas investigadas.
- Com relação à resistência mecânica, observou-se, no geral, que incorporações elevadas de lodo reduziram a tensão de ruptura à flexão da massa argilosa.
- Foi observado que incorporações de lodo a partir de 5% aumentam a absorção de água da cerâmica.
- Somente a massa argilosa pura e a composição com 2,5% de lodo queimadas a 1000°C, atenderam a especificação da absorção de água para a fabricação de blocos de vedação.
- Finalmente, os resultados indicaram que o lodo de Eca investigado deve ser incorporado na massa argilosa em percentuais ao redor de 2,5% para evitar efeito deletério na absorção de água e na resistência mecânica da cerâmica.

- A maior importância para a utilização dos resultados obtidos neste trabalho pode ser para o meio ambiente, tendo em vista a real possibilidade de utilização deste lodo como matéria prima, como forma adequada de destinação final, prevenindo uma possível contaminação do meio ambiente e minimizando da extração de recursos naturais para a fabricação de cerâmicas.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudar a incorporação do lodo de ECA em outros tipos de massa argilosa
- Realizar ensaio de análise de gases com o intuito de avaliar emissões atmosféricas visando atendimento a legislação ambiental.
- Testar o processo de extrusão para a confecção dos corpos de prova.
- Realizar teste industrial variando a temperatura de queima, e o porcentual de incorporação do lodo amarelo de ECA na massa cerâmica.
- Realizar ensaios de lixiviação e solubilização para realizar uma caracterização ambiental de acordo com a norma NBR 10004.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abajo, M. F. (2000). *Manual Sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos*, Ed. BERALMAR S.A., Terrassa, Espanha.

Achon, C. L. (2008). *Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água a luz dos conceitos da ISO 14.001*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 230 p.

Adler, E. (2002). *Drinking water sludges: overview in France in 2002*. In: *Management of wastes from drinking water treatment*. International Conference, Organised by The Chartered Institution of Water and Environmental Management, London, September.

American Society for testing and Materials (1977a). *Water Absorptin, Bulk Density, Apparent Porosity and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*, C373-72, USA.

American Society for testing and Materials (1977b). *Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials*, C674-77, USA.

Andrade, P.S. (2005). *Avaliação do impacto ambiental da utilização de resíduos de estações de tratamento de água em indústrias de cerâmica vermelha: estudo de caso*. Dissertação de mestrado. Mestrado em engenharia civil- área de concentração: Saneamento e meio ambiente. Unicamp. Campinas.

Angelim, S. C. M. (2008). *Disposição de Resíduos de Estação de Tratamento de Água em lagoa facultativa de esgoto: caracterização da ETA*. Escola de Engenharia Civil, UFG. Aluna do curso de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente, PPGEMA. Bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás – FAPEG.

Associação Brasileira de Cerâmica (2013). *Informações Técnicas - Definição e Classificação*. Disponível em <http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4>. Acessado em maio de 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984a). *Determinação do Limite de Plasticidade*. NBR 7180, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984c). *Determinação da Análise Granulométrica de solos*. ABNT NBR 7181/1984. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004a). *Resíduos Sólidos – Classificação*. NBR 10004. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004b). *Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido*. NBR 10005, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. ABNT NBR 10006. 2ª Ed.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). Componentes Cerâmicos - telhas ABNT NBR 15310, Rio de Janeiro.

Barroso, M. M. (2008). *Gerenciamento de Resíduos de ETAs*, Disciplina: Sistema de Água A, UNIR - Universidade Federal de Rondônia Departamento de Engenharia Engenharia Ambiental.

Bleicher, L; Frota, F. H. S. (2006). *Fluoretação da água: uma questão de política pública - o caso do Estado do Ceará*. Ciência e saúde coletiva, v.11, n.1, p.71-78.

Botero, W. G. (2009). *Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola*. Quim. Nova, Vol. 32, No. 8, 2018-2022.

Brasil (1997a). Lei n. 9433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 9 jan. 1997. Seção 1, p. 470, v. 135, n. 6. 17 p.

Brasil (1997b). Resolução CONAMA Nº 237 de 19 de dezembro de 1997. Procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental como instrumento de gestão ambiental. Brasil: Ministério do Meio Ambiente.

Brasil (2005). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Diário oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005.

Brasil (2010). Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Congresso Nacional.

Carty, W. M. e Senepati, U. (1998). J. Am. Ceram. Soc. 81, 3-20.

Castro, T. M. de (2010). *Solidificação/estabilização de lodo gerado no tratamento de efluente de lavanderia industrial têxtil em blocos cerâmicos acústicos e seu desempenho em câmara reverberante*. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

Cordeiro, J. S. (2001). *Gerenciamento Integrado de Resíduos de Estações de Tratamento de Águas*. Anais... 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, cd, I – 062.

Cornwell, D. A.; Mutter, R. N.; Vandermeijden, C. (2000). *Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals*. Denver: American Water Works Association.

Cornwell, D. A. (2006). *Water treatment residuals engineering*. Denver: AWWA Research Foundation and American Water Works Association.

Couto, V. M. P.; (2011). *Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos derivados do processamento dos resíduos de estação de tratamento de água*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, Rio de Janeiro: UFRJ / EQ, xiv, 113 f.: il.

Cubillos, A. (1981). *Calidad y Control de La polucion del Agua*. Mérida: CIDIAT/Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. (Mimeo.) (Série Ambiente y Recursos Naturales Renovables, AR 14).

Di Bernardo, L; Di Bernardo, A; Centurione Filho, P. L. (2002). *Ensaio de tratabilidade de água e de resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água*. São Carlos-SP, 236p.

Di Bernardo, L.; Dantas, A. B. (2005). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. São Carlos-SP.

Dondi, M.; Marsigli, M.; Fabbri, B. (1997a). *Recycling of industrial and urban wastes in brick production – A review*. Tile & Bricks International, v. 13, n.3, p.218-225.

Dondi, M.; Marsigli, M.; Fabbri, B. (1997b). *Recycling of industrial and urban wastes in brick production – A review (Part 2)*. Tile & Bricks International, v. 13, n.4, p.302-308.

Educadores (2014). *Tratamento de água*. Governo do Estado do Paraná. Disponível em <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/modules/mylinks/viewcat.php?cid=6&min=10&orderby=ratingD>. Acessado em abril de 2014.

Facincani, E. (1993). *Tecnologia Cerâmica – los Ladrillos*, Faenza Editrice Iberica S. L. Editora, Barcelona, Espanha, 263.

Facincani, E. (2002). *Tecnología Cerámica - Cerâmica Estrutural*, Faenza Editrice do Brasil, S. Paulo, SP, 28.

Ferranti E. M., Gehling G. R., (2005). *Anais do 23º Cong. Bras. Eng. Sanit. Amb.* 1-7.

Filho, J. D. S. e Rita, E. S. S. (2011). *Gerenciamento do Resíduo Gerado na Clarificação de Água da RLAM*, Monografia de Pós-Graduação, Escola Politécnica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - São Paulo, 139 p.

Francisco, A. A.; Pohlmann, P. H. M.; Ferreira, M. A. (2011). *Tratamento convencional de águas para abastecimento humano: uma abordagem teórica dos processos envolvidos e dos indicadores de referência*. II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.

Ghizoni, G. R. S. (2013). *Fabricação de pastilhas cerâmicas com lodo proveniente de estações de tratamento de água - estudo de caso, ETA- Pato Branco, Paraná*. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a

obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus - Pato Branco.

Gaidzinski, R. (2006). *Estudo do Sazonamento de Argilas para a Utilização na Indústria Cerâmica*. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.

Governo do Japão (2013). Ministério do Desenvolvimento. *Disposição do lodo das ETA's no Japão em 2005*. Disponível em <http://www.env.go.jp/en/headline/headline.php?serial=668>. Acessado em: Agosto de 2013.

Götttsching, L.; Pakarinen, H. (2000). *Recycled fiber and deinking*, editora TAPPI, livro 7°.

Heller, L.; Pádua, V. L. (2006). *Abastecimento de água para consumo humano*. 1º Ed. Minas Gerais: UFMG.

Henrique, P. (2013). *Fleximetria térmica como técnica para medição de planaridade de revestimentos cerâmicos durante a queima*. Criciúma, SC, Ed. do Autor, Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2013.

Hoppen, C.; Portella, K. F.; Joukoski, A.; Baron, O.; Franck, R.; Sales, A.; Andreoli, C. V.; Paulon, V. A. (2005). *Co-disposição de lodo centrifugado de estação de tratamento de água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental*. In *Cerâmica*, v. 51, n. 318, p. 85-95.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2013). Disponível em <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=330100#> Acessado em junho de 2013.

Katayama, V. T. (2012). *Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica*. Dissertação de Mestrado.

Klein, C. (2002). *Mineral Science*, 22 ed., John Wiley & Sons, New York. 641p.

Macedo, J. A. B. (2007). *Águas e Águas*. 3º Ed. Minas Gerais: CRQ – MG.

Margem, J. I.; Vieira, C. M. F.; Ferreira, A. D.; Alexandre, J., Monteiro, S. N (2006). Avaliação da incorporação de lodo de filtro de eta em cerâmica vermelha. 61º Congresso Anual e Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, Rio de Janeiro, 24 a 27 de julho de 2006.

Margem, J. I. (2008). *Caracterização e Incorporação de Lodo de Decantação de Estação de Tratamento de Água (E.T.A) em Cerâmica Vermelha*. Dissertação de Mestrado.

Medeiros, E. N. M. (2010). *Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de ETA*. Dissertação (Doutorado) - Universidade de

Brasília. Curso de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Tese De Doutorado Em Estruturas E Construção Civil, Brasília.

Ministério Público de Minas Gerais (2009). Parecer Técnico - Ref.: Ofício 1139/2008 (CAO-MA) - *Informações técnicas referentes aos danos ambientais decorrentes do lançamento de lodo in natura, pelas Estações de Tratamento de Água, no ambiente*. Belo Horizonte: Procuradoria-Geral de Justiça, 32 p.

Monteiro, S.N.; Alexandre, J.; Margem, J.I.; Sanchez, R.; Vieira, C.M.F. (2008). *Incorporation of Sludge from Water Treatment Plant into Red Ceramic*. Construction and Building Materials. 22 : 1281–1287.

Motta, J. F. M.; Zanardo, A.; Cabral Junior, M. (2001). *As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos*. Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 28-39.

Mota, S. (2006). *Introdução à engenharia ambiental 4ª Edição*. Rio de Janeiro: ABES.

Oliveira, E. M. S. (2004). *Estudo da valorização e reciclagem de resíduo proveniente de estação de tratamento de águas em cerâmica vermelha*. 112 p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados, Campos dos Goytacazes-RJ.

Oliveira, E. M. S.; Machado, S. Q.; Holanda, J. N. F. (2008). *Influence of the addition of water treatment sludge on the properties and microstructure of red ceramic*. Cerâmica, vol.54, n.330, p. 167-173. ISSN 0366-6913.

Organização Mundial de Saúde – OMS (2004). *Guidelines for Drinking-Water Quality*. Volume 1, Geneva, SW. 494p.

Paixão, L. C. C.; Yoshimura, H. N.; Espinosa, D. C. R.; Tenorio, J. A. S. (2008). *Effect of addition of high iron content sludge from water treatment plant on a clay-based ceramic*. Cerâmica [online]. vol.54, n.329, pp. 63-76. ISSN 0366-6913.

Paulsrud, B.; Storhaug, R.; Hem L. J. (2002). *Management of Wastes from Drinking Water Treatment in Norway*. In: Management of Wastes from Drinking Water Treatment. The Chartered Institution of Water and Environmental Management. London, UK.

PCJ. (2011). Oficina de lançamento dos resultados da 1º Etapa. *Estudo de viabilidade para instalação e operação de centrais de lodos nas Bacias PCJ. Consórcio das Bacias Hidrográficas PCJ - Piracicaba, Capivari e Jundiaí*, 7 p. Disponível em <<http://www.agua.org.br/apresentacao-arquivos.aspx?id=73>>. Acesso em: maio de 2013.

Peçanha Jr., L. A.; Monteiro, S. N.; Vieira, C. M. F. (2005). *Avaliação da mistura de argilas de campos dos Goytacazes utilizada em cerâmicas vermelhas*. In: 49º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Pedro.

Pereira, P. S.; Morais, A. S. C.; Caldas, T. C. C.; Ribeiro, M. M.; Monteiro, S. N.; Vieira, C. M. F. (2011). *Caracterização de Argila Utilizada para Fabricação de Cerâmica Vermelha*. In: 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Porto de Galinhas.

Pinheiro, R. M.; Vieira, C. M. F. (2011). *Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha*. Cerâmica 57, 319-323.

Pinheiro, B. C. A., Holanda, J. N. F. (2010). Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha, Cerâmica vol. (56), 237-243.

Portella, K. F.; Andreoli, C.V.; Hoppen, C.; Sales, A. Baron, O. (2003). Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba – Pr. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL. Joinville.

Pozzobon, J. C.; Lucas, J. F. R.; Díaz Mora, N. (2010). *Aplicação de lodo de estação de tratamento de água para a produção de cerâmica artística*. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 54., 2010, Foz do Iguaçu. Anais... São Paulo: ABC.

Pracidelli, S. F. G. Melchiades, (1997). *Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha*. Cerâmica Industrial.

RIBEIRO, M.J; FERREIRA, A.A.L.; LABRINCHA, J.A. (2003). *Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelha*. Cerâmica Industrial, vol. 8, n. 1, p. 37–42,

Richter, C. A.; Azevedo Netto, J. M. (1991). *Tratamento de água: tecnologia atualizada*. Edgard Blucher Ltda.

Richter, C. A.; Azevedo Netto, J. M. (2002). *Tratamento de água: tecnologia atualizada*. São Paulo: Edgard Blucher, 332 p.

Rodrigues, L. P. (2012). Incorporação de resíduo de estação de tratamento de água e Campos dos Goytacazes em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento – Campos dos Goytacazes, 2012. xvii, 89 f. : il. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

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

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

Santos, I. S. S. *et al.* (2000). Caracterização e identificação do resíduo: lodo da Estação de Tratamento do município de São Leopoldo. In: Congresso interamericano de engenharia sanitária e ambiental, 27, 2000, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ABES, 2000.

Santos, I. S. S., Ramires, M. V. V., Silva, H. C., Kern, A. P., Camargo, S. A., Segadães, A. M., Kniess, C., Acchar, W., Kuhnen, N. C., Hotza, D. (2004). *Pré-laboratory assensment of the reuse potential of industrial wastes in Clay-based produtcts*. Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology. Madrid, ES, p.503-510.

Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (2013). *O que são resíduos?* Disponível em <http://www.sebrae.com.br/setor/agroenergia/o-setor/residuos-e-dejetos/o-que-e/>. Acessado em agosto de 2013.

Silva, J. F. P. (2006). *Reciclagem de resíduos sólidos*. Disponível em <http://br.monografias.com/trabalhos2/reciclagemresiduos/reciclagemresiduos2.sh>. Acessado em agosto de 2013.

Silva, C. A. da; Silveira, C; Silva, F. A. da; Klen, M. R. F.; Bergamasco, R. (2012). Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes PAC e Moringa oleífera. ENGEVISTA, V. 14, n. 3. p. 302-309, dezembro 2012.

Simpson, A.; Burgess, P.; Coleman, S. J. (2002). *The Management of Potable Water Treatment Sludge: Present Situation in the UK*. In: Management of Wastes from Drinking Water Treatment. *Proceedings*. London: The Chartered Institution of Water and Environmental Management, p. 29-36.

Sousa, M. R. (2009). *Estudo do Lodo gerado na Estação de Tratamento de Água de Buíque – PE: caracterização, quantificação e identificação de oportunidades de minimização dos resíduos*. Dissertação (Mestrado em química) – Programa de Pós Graduação em Química, Pró Reitoria de Pós Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe.

Souza, V. P.; Toledo, R.; Holanda, J. N. F.; Vargas, H.; Faria Jr., R. T. (2008). *Pollutant gas analysis evolved during firing of red ceramic incorporated with water treatment plant sludge*. Cerâmica 54, 351-355.

Takada, C. R. S.; Serra, J. C. V.; Mafra, W. A.; Borba, K. C. A. (2013). *Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água no município de Palmas – TO*. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v.10, n. 2, p. 157-165.

Tallini Junior, V. M. (2009). Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de lodo de estações de tratamento de água, microesferas de vidro de jateamento, sais de neutralização de ácidos de bateria e areia de fundição. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 83p. Curitiba-PR.

Tartari, R.; Días-Mora, N.; Módenes, A. N.; Pianaro, S. A. (2011a). *Generated sludge at water treatment station Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, as additive in red clay for ceramics. Part I: Characterization of sludge and clay Paraná third plateau*. Cerâmica 57, 288-293.

Tartari, R.; Módenes, A. N.; Pianaro, S. A.; Días-Mora, N. (2011b). *Sludge generated in the water treatment plant Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, as an additive in clay for*

*red ceramic. Part II: Incorporation of sludge mixed with clay to produce red ceramic.* Cerâmica 57, 387-394.

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

Teixeira, S. R.; De Souza, S. A.; De Souza, N. R.; Aléssio, P.; Santos, G. T. A. (2006). *Effect of the addition of sludge from water treatment plants on the properties of structural ceramic material.* Cerâmica 52, 215-220.

Tsutiya, Milton T.; Hirata, Angélica Y. (2001). *Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água do Estado de São Paulo.* 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa: ABES.

Vernilli, F. (2014). *Figura da Estação de Flocculação.*

Vieira, C. M. F.; Holanda, J. N. F.; Pinatti, D. G. (2000). *Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ.* Cerâmica, v. 46 n° 297.

Vieira, C. M. F. (2001). *“Caracterização das argilas de Campos dos Goytacazes visando a fabricação de revestimento cerâmico semiporoso”.* Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais, UENF, Campos dos Goytacazes-RJ.

Vieira, C. M. F.; Monteiro, S. N.; Duailibi Filho, J. (2001). *Formulação de Massa de Revestimento Cerâmico com Argilas Plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP).* Cerâmica Industrial 6, 43-49.

Vieira, C. M. F.; Monteiro, S. N. (2003). *Influência da temperatura de queima na microestrutura de argilas de Campos dos Goytacazes-RJ.* Cerâmica 49, 6-10.

Vieira, C. M. F.; Soares, T. M.; Monteiro, S. N. (2003). *Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima.* Cerâmica 49, 245-250.

Vieira, C. M. F.; Souza, E. T. A.; Monteiro, S. N. (2004). *Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha.* Cerâmica 50 254–260.

Vieira, C. M. F.; Monteiro, S. N.; Duailibi Filho, J. (2005). *Considerações sobre o Uso da Granulometria como Parâmetro de Controle de uma Argila Sedimentar.* Cerâmica. Industrial 10, 23-26.

Vieira, C. M. F.; Terrones, L. A.; Sánchez, R.; Monteiro, S. N. (2007). *Características e efeito da fração granulométrica < 2 mm no comportamento de queima de uma argila.* Cerâmica 53, 249-254.

Vieira, C. M. F.; Margem, J. I. II; Monteiro, S. N. I. (2008). *Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA.* Revista Matéria, v. 13, n. 2, pp. 275 – 281.

Vieira, C. M. F.; Monteiro, S. N. (2009). Incorporation of solid waste in red ceramics – na updated review. *Revista Matéria*, v.14, n°3, p.881-905. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11097>.

Vieira, C. M. F.; Pinheiro, R. M. (2011). *Avaliação de argilas cauliníticas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha*. *Cerâmica* vol. 57 n° 343, São Paulo.

Vitorino, J. P. D.; Monteiro S. N.; Vieira C. M. F. (2009). *Characterization and incorporation of wastes from Water Treatment Plant into clayey ceramic*. *Cerâmica* 55, 385-392.

Wolf, E.; Schwabe, W. K.; Landim, A. B.; Vitorino, M. D.; Santos, W. L. (2007). A Substituição da Argila por Lodo de ETA na Produção de Cerâmica Vermelha. In. *Anais do 510 Congresso Brasileiro de Cerâmica*. ABC, Salvador – Ba. 12p.