

INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES (ETE) DE LAVANDERIA INDUSTRIAL EM CERÂMICA
VERMELHA

MILENA DAS NEVES FERREIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

FEVEREIRO – 2018

INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES (ETE) DE LAVANDERIA INDUSTRIAL EM CERÂMICA
VERMELHA

MILENA DAS NEVES FERREIRA

“Dissertação 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”.

Área de Concentração: Materiais e meio ambiente

Orientador: Prof. DSc. Carlos Maurício Fontes Vieira.

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

FEVEREIRO – 2018

INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES (ETE) DE LAVANDERIA INDUSTRIAL EM CERÂMICA
VERMELHA

MILENA DAS NEVES FERREIRA

“Dissertação 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”.

Área de Concentração: Materiais e meio ambiente

Comissão Examinadora:

Angelus Giuseppe Pereira da Silva (D.Sc. Eng. e Ciências dos Materiais) – UENF

Michelle Pereira Babisk (D.Sc., Eng. e Ciências dos Materiais)– CCT/LAMAV/UENF

Mônica Manhães Ribeiro (D.Sc., Eng. e Ciências dos Materiais) - IFF

Carlos Maurício Fontes Vieira (D.Sc., Eng. e Ciências dos Materiais) - UENF

(Orientador)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, meus irmãos, minha família e namorado que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus que todos os dias de minha vida me deu forças para nunca desistir.

Aos meus pais, Licínio e Lindinalva, pelo amor e competência em educar-me e me mostrar o caminho certo, incentivando sempre a busca pelo conhecimento. Amo vocês!

Aos meus irmãos, Carlos e Ulisses, pelo exemplo de pessoa e profissionais, cuja determinação me motiva e inspira.

A minha família, pelo apoio, pelo incentivo e por compreender a minha ausência por vezes durante esses longos anos de estudo. Especialmente aos meus primos Roberta, Livia e Victor, com quem sei que sempre posso contar.

Ao meu namorado Lucas, pelo companheirismo, cumplicidade, incentivo, ajuda e compreensão durante os momentos de ausência e *stress*.

As amigas: Caroline Oliveyra, Juliana Licurgo, Larissa Simão, Leticia Lima e Livia Stafanato pela companhia, risos, desabafos, pela amizade e ajuda prestada.

Ao Carlinhos, Geovana, Micaela, Marilena e Lucas por terem me ajudado na realização dos ensaios de laboratório.

Ao meu orientador, Carlos Maurício Fontes Vieira, pela compreensão e orientação durante a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro e a todos os professores que passaram pela minha formação e comigo dividiram seus conhecimentos.

A equipe técnica do LAMAV e do LECIV pelo auxílio na consecução dos ensaios, em especial ao Gabriel, Michel, Shirlene, Silvio, Milton e Vanúzia.

A Rosane que me auxiliou na análise de DRX.

A Lavanderia Cinco Estrelas pelo fornecimento do resíduo utilizado neste trabalho.

A CAPES pela bolsa de estudo que possibilitou a dedicação exclusiva durante este trabalho.

Ao CETEM e a Mônica Borlini pela realização dos ensaios de lixiviação e solubilização.

A Rodolfo Azevedo Gama, pelo fornecimento das argilas utilizadas na pesquisa.

Ao professor Angelus Giuseppe, a Michelle Babisk e Mônica Manhães por gentilmente se disporem a compor a banca.

Àqueles que não foram citados, mas, que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal e para realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!!!

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE TABELAS | XI |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XII |
| RESUMO | XIII |
| ABSTRACT | XIV |
| | |
| Capítulo 1- Introdução | 1 |
| Capítulo 2- Objetivos | 3 |
| 2.1. Objetivo Geral..... | 3 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 3 |
| Capítulo 3- Justificativas | 4 |
| Capítulo 4- Revisão Bibliográfica | 5 |
| 4.1. Indústria Têxtil..... | 5 |
| 4.1.1. Indústria Têxtil no Brasil..... | 5 |
| 4.1.2. Lavanderia Têxtil Industrial..... | 6 |
| 4.1.2.1. Efluente de Lavanderia Têxtil..... | 8 |
| 4.1.2.2. Tratamento de efluente de lavanderia industrial..... | 9 |
| 4.1.2.3 Lodo de ETE de Lavanderia Industrial..... | 12 |
| 4.2. Resíduos sólidos..... | 12 |
| 4.2.1. Definição..... | 13 |
| 4.2.2. Classificação..... | 13 |
| 4.2.3. Resíduos Sólidos Industriais..... | 16 |
| 4.3. Reciclagem e tratamentos de resíduos..... | 17 |
| 4.3.1. Secagem e desidratação..... | 19 |
| 4.3.2. Aterro Industrial..... | 19 |
| 4.3.3. Compostagem..... | 21 |
| 4.3.4. Incineração..... | 21 |
| 4.3.5. Landfarming..... | 23 |
| 4.3.6. Solidificação/Estabilização..... | 24 |
| 4.3.7. Incorporação de resíduos em cerâmica vermelha..... | 25 |
| 4.4. Argila..... | 28 |
| 4.5. Cerâmica Vermelha..... | 29 |
| 4.5.1. Pólo Cerâmico na Região de Campos dos Goytacazes..... | 30 |
| 4.6. Incorporação de lodo de ETE de lavanderia industrial em cerâmica vermelha..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Capítulo 5- Materiais e Métodos | 48 |
| 5.1. Materiais..... | 49 |
| 5.2. Métodos..... | 50 |
| 5.2.1. Beneficiamento das matérias-primas..... | 50 |
| 5.2.2. Caracterização das matérias-primas..... | 50 |
| 5.2.2.1. Caracterização Química..... | 51 |
| 5.2.2.1.1. Fluorescência de Raios X (FRX)..... | 51 |
| 5.2.2.2. Caracterização mineralógica..... | 51 |
| 5.2.2.2.1. Difração de raios X..... | 51 |
| 5.2.2.3. Caracterização Física..... | 51 |
| 5.2.2.3.1. Peneiramento e sedimentação por gravimetria..... | 51 |
| 5.2.3. Análises Térmicas (ATD/TG/DTG)..... | 52 |
| 5.2.4. Preparação das formulações..... | 53 |
| 5.2.4.1. Plasticidade..... | 54 |
| 5.2.5. Processamento dos corpos de prova..... | 54 |
| 5.2.6. Ensaio físicos e mecânicos dos corpos de prova..... | 55 |
| 5.2.6.1. Densidade aparente..... | 55 |
| 5.2.6.2. Absorção de água..... | 56 |
| 5.2.6.3. Retração linear de queima..... | 56 |
| 5.2.6.4. Tensão de Ruptura à Flexão..... | 57 |
| 5.2.7. Análise microestrutural..... | 57 |
| 5.2.7.1. Microscopia óptica (MO)..... | 57 |
| 5.2.7.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)..... | 57 |
| Capítulo 6- Resultados e Discussões | 59 |
| 6.1. Caracterização das matérias primas..... | 59 |
| 6.1.1. Argilas..... | 59 |
| 6.1.1.1. Composição química..... | 59 |
| 6.1.1.2. Difração de raios X (DRX) | 60 |
| 6.1.1.3. Granulometria..... | 62 |
| 6.1.2. Lodo de ETE de lavanderia industrial..... | 63 |
| 6.1.2.1. Composição química..... | 63 |
| 6.1.2.2. Difração de raios X (DRX)..... | 64 |
| 6.1.2.3. Análise térmica..... | 65 |
| 6.1.2.3.1. Termogravimetria (TG)..... | 65 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1.2.3.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)..... | 66 |
| 6.1.2.4. Microscopia eletrônica de varredura do lodo em pó..... | 67 |
| 6.1.2.5. Granulometria..... | 68 |
| 6.2. Caracterização das composições..... | 70 |
| 6.2.1. Plasticidade..... | 70 |
| 6.2.2. Dilatometria..... | 72 |
| 6.2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas..... | 74 |
| 6.2.3.1. Densidade a seco..... | 74 |
| 6.2.3.3. Retração Linear de Queima..... | 75 |
| 6.2.3.4. Absorção de água..... | 76 |
| 6.2.3.5. Tensão de ruptura à flexão..... | 77 |
| 6.2.4. Análise microestrutural | 79 |
| 6.2.4.1. Microscopia óptica (MO)..... | 79 |
| 6.2.4.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)..... | 80 |
| Capítulo 7- Conclusões..... | 82 |
| Capítulo 8- Sugestões para trabalhos futuros..... | 85 |
| Capítulo 9- Referências bibliográficas..... | 86 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 - Fluxograma geral do processo de tratamento do efluente de uma lavanderia industrial têxtil. (FONTE: CASTRO, 2010)..... | 11 |
| Figura 4.2- Fluxograma para classificação dos resíduos sólidos de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004)..... | 15 |
| Figura 4.3. Análise termogravimétrica e análise térmica diferencial da massa argilosa. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 32 |
| Figura 4.4. Análise termogravimétrica e análise térmica diferencial do lodo. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 32 |
| Figura 4.5. Absorção de água das formulações a 950°C. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 33 |
| Figura 4.6. Absorção de água das formulações a 1050°C. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 33 |
| Figura 4.7. Absorção de água das formulações a 1150°C. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 34 |
| Figura 4.8. Tensão de ruptura a flexão das formulações a 950°C. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 34 |
| Figura 4.9. Tensão de ruptura a flexão das formulações a 1050°C. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 34 |
| Figura 4.10. Tensão de ruptura a flexão das formulações a 1150°C. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 34 |
| Figura. 4.11. Difratoograma da argila. FONTE: SOARES (2016)..... | 36 |
| Figura. 4.12. Difratoograma do lodo. FONTE: SOARES (2016)..... | 36 |
| Figura. 4.13. Curvas de TG e DTA da argila. FONTE: SOARES (2016)..... | 36 |
| Figura. 4.14. Curvas de TG e DTA do lodo. FONTE: SOARES (2016)..... | 36 |
| Figura 4.15. Absorção de água nos blocos cerâmicos em escala reduzida FONTE: DIAS <i>et al.</i> (2014)..... | 43 |
| Figura 4.16 - Resistência característica à compressão nos blocos cerâmicos em escala reduzida. FONTE: DIAS <i>et al.</i> (2014)..... | 43 |
| Figura 5.1- Fluxograma esquemático do procedimento experimental..... | 48 |
| Figura 5.2. Argila amarela..... | 49 |
| Figura 5.3. Argila de Itaboraí..... | 49 |
| Figura 5.4. Lodo de ETE seco..... | 49 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 5.5. Estufa utilizada na secagem dos materiais..... | 50 |
| Figura 5.6. Extrusora utilizada na confecção dos corpos de prova..... | 54 |
| Figura 5.7. Forno utilizado na queima dos corpos de prova..... | 55 |
| Figura 6.1- Difratoograma de raios X da massa cerâmica..... | 61 |
| Figura 6.2 - Distribuição do tamanho de partículas da massa cerâmica..... | 63 |
| Figura 6.3 - Difratoograma de raios X do Lodo de ETE de lavanderia industrial... | 65 |
| Figura 6.4 - Curvas de TG/DTG do lodo de lavanderia..... | 66 |
| Figura 6.5 - Curvas de TG/DSC do lodo de lavanderia industrial..... | 67 |
| Figura 6.6 - Micrografias (MEV) do lodo de lavanderia em pó, em diferentes aumentos. (a)500x e (b)1500x..... | a)67 b)68 |
| Figura 6.7 - Distribuição do tamanho de partículas do lodo de ETE de lavanderia industrial..... | 69 |
| Figura 6.8 - Diagrama de Winkler com a localização da massa cerâmica, do lodo e das formulações. | 70 |
| Figura 6.9 - Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg..... | 72 |
| Figura 6.10 - Dilatometria das formulações F0 e F10..... | 73 |
| Figura 6.11- Densidade relativa a seco das composições..... | 74 |
| Figura 6.12- Retração linear de queima das composições nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C indicando a variação do tamanho da peça de acordo com MÁ S (2002)..... | 76 |
| Figura 6.13- Absorção de água das composições nas temperaturas de 800,900 e 1000°C..... | 77 |
| Figura 6.14- Tensão de ruptura à flexão das composições nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C. | 78 |
| Figura 6.15- Microscopia óptica, com aumento de 430x, das peças com 0% de lodo, queimadas a: a) 800°C b)1000°C..... | 79 |
| Figura 6.16- Microscopia óptica, com aumento de 216x, das peças com 10% de lodo, queimadas a: a) 800°C b)1000°C..... | 80 |
| Figura 6.17 - Micrografias (MEV) da superfície da cerâmica sem adição de resíduo, com aumento de 1000x, em diferentes temperaturas. (a)800°C e (b)1000°C..... | 81 |
| Figura 6.18 - Micrografias (MEV) da superfície da cerâmica com 10% de resíduo, com aumento de 45x, em diferentes temperaturas. (a)800°C e (b)1000°C..... | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1. Resultado da análise química do lodo e da massa argilosa. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 31 |
| Tabela 4.2- Resultados da análise dos corpos de provas após queima a 950°C, 1050°C e 1150°C. FONTE: AQUINO <i>et al.</i> (2015)..... | 33 |
| Tabela 4.3. Análise química da argila. FONTE: SOARES (2016)..... | 35 |
| Tabela 4.4. Análise química do lodo. FONTE: SOARES (2016)..... | 35 |
| Tabela 4.5. Resultado do extrato lixiviado. FONTE: SOARES (2016)..... | 37 |
| Tabela 4.6. Resultado do extrato solubilizado. FONTE: SOARES (2016)..... | 38 |
| Tabela 4.7. Resultados das propriedades técnicas das barras cerâmicas nas diferentes temperaturas e formulações. FONTE: SOARES (2016)..... | 39 |
| Tabela 4.8 - Caracterização da argila e lodo. FONTE: DIAS <i>et al.</i> (2014)..... | 41 |
| Tabela 4.9. Ensaio de lixiviação e solubilização do lodo. FONTE: DIAS <i>et al.</i> (2014)..... | 42 |
| Tabela 4.10. Concentração de metais do extrato lixiviado dos blocos cerâmicos (NBR 10005(2004)). FONTE: DIAS <i>et al.</i> (2014)..... | 44 |
| Tabela 4.11. Concentração de metais do extrato solubilizado dos blocos cerâmicos (NBR 10006(2004)). FONTE: DIAS <i>et al.</i> (2014)..... | 44 |
| Tabela 5.1 – Composição das formulações preparadas..... | 53 |
| Tabela 6.1- Composição química das argilas (% em peso)..... | 60 |
| Tabela 6.2 - Composição química do lodo (% em peso)..... | 64 |
| Tabela 6.3 - Distribuição das faixas granulométricas das amostras..... | 68 |
| Tabela 6.4 - Limites de Atterberg das formulações..... | 70 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------|---|
| A.A. | Absorção de Água |
| Aam | Argila Amarela |
| ABIT | Associação Brasileira de Indústrias Têxteis |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AOX | Haletos Orgânicos Adsorvíveis |
| DRX | Difração de Raios-X |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| EDS | Espectro de Energia Dispersiva de Raios-X |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| ETAs | Estação de Tratamento de Águas |
| ETEs | Estação de Tratamento de Efluentes |
| FRX | Fluorescência de Raios-X |
| IP | Índice de Plasticidade |
| LL | Limite de Liquidez |
| LP | Limite de Plasticidade |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| MO | Microscopia ótica |
| NBR | Norma Brasileira |
| S/E | Solidificação/Estabilização |

RESUMO

FERREIRA, M. N. **Incorporação de lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) de lavanderia industrial em cerâmica vermelha.** 2018. 107f. Dissertação – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2018.

As lavanderias industriais geram, durante o processo de lavagem e tingimento uma grande quantidade de efluentes que devem ser tratados antes da sua destinação final. Após esse tratamento obtém-se o lodo. Este lodo gera um problema ambiental para estas empresas, pois apresenta metais pesados em sua composição, advindos dos corantes. Desta forma, este resíduo não deve ser disposto sem um tratamento adequado. Com o intuito de mitigar o impacto ambiental provocado pela disposição deste resíduo no ambiente, este trabalho teve como objetivo, incorporar e avaliar o efeito da incorporação do lodo de lavanderia industrial nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica vermelha. No desenvolvimento do trabalho foram utilizadas como matérias-primas argila Amarela do município de Campos dos Goytacazes-RJ, argila Vermelha do município de Itaboraí-RJ, ambas coletadas na Cerâmica Rodolfo Sardinha, e lodo de lavanderia industrial, proveniente da Lavanderia Cinco Estrelas, localizada em São João de Nepomuceno-MG. O resíduo foi adicionado à argila em percentuais de 0; 2,5; 5 e 10% em peso. Os corpos de prova foram preparados por extrusão e posteriormente submetidos ao processo de queima em temperaturas de 800, 900 e 1000°C. As matérias-primas foram caracterizadas pela granulometria, fluorescência de raios X e difração de raios X. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas como, retração linear, absorção de água e resistência mecânica à flexão dos corpos de prova queimados. A microestrutura foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica (MO). Nos resultados obtidos observou-se que a resistência à flexão é inversamente proporcional à quantidade de lodo adicionada, enquanto a absorção de água e a retração linear são diretamente proporcionais à mesma quantidade de lodo incorporado. Dessa forma, indica-se a incorporação de até 5% do lodo em massa cerâmica, pois sua elevada quantidade pode prejudicar algumas propriedades da cerâmica além de aumentar a ocorrência de poros no material.

Palavras-chave: cerâmica vermelha; lodo de lavanderia industrial; reciclagem.

ABSTRACT

FERREIRA, M. N. **Incorporation of sludge from effluent treatment plant of industrial laundry into heavy clay ceramics.** 2018. 107f. Dissertation – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2018.

Industrial laundries generate, during the process of washing and dyeing a large amount of wastewater that must be treated before to final disposal. After this treatment the sludge is obtained. This sludge generates an environmental issue for these companies because it presents heavy metals in its composition, coming from dye. Thus, this residue must not be arranged without a proper treatment. In order to mitigate the environmental impact caused by the disposal of this waste in the environment, this study aimed to incorporate and evaluate the effect of the incorporation of the industrial laundry sludge in the physical and mechanical properties of red ceramic. In developing this work were used as raw materials yellow clay from Campos Goytacazes-RJ, red clay from Itaboraí-RJ, both collected in the Rodolfo Sardinha Ceramic, and industrial laundry sludge from the Cinco Estrelas laundry, located in São João de Nepomuceno-MG. The residue was added to the clay in percentage of 0; 2,5; 5 and 10% by weight. The specimens were prepared by extrusion and subsequently fired in temperatures of 800°C, 900°C and 1000°C. The raw materials were characterized for particle size, X-ray fluorescence and X-ray diffraction, the physical and mechanical properties were measured as linear shrinkage, water absorption and flexural strength of the fired specimens. The microstructure was evaluated by scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy (OM). From the results we obtained it was observed that the flexural strength is inversely proportional to the amount of added sludge, while the water absorption and the linear shrinkage is directly proportional to the same amount of sludge incorporated. Thus, the incorporation of up to 5% by weight ceramic clay is indicated because a large amount may adversely affect some properties of ceramics in addition to increasing the occurrence of pores in the material.

Keywords: red ceramic; the industrial laundry sludge; recycling.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Segundo Leal (2016), o crescimento da população urbana, e o consumo desenfreado, têm contribuído para o aumento da geração de resíduos sólidos. Dessa forma, o manejo inadequado desses resíduos gera desperdícios, contribui para degradação ambiental e ameaça à saúde pública, comprometendo a qualidade de vida da população.

Assim, a destinação final adequada dos resíduos sólidos tem sido um dos maiores problemas da sociedade moderna, pois além da grande quantidade de resíduo gerada, a destinação desses resíduos deve ser realizada de maneira a atender as exigências presentes na Lei 12305 (2010). Dessa forma, houve a necessidade de buscar novos conceitos e soluções, dentro de uma visão de sustentabilidade e comprometimento com a questão ambiental (MILANEZ *et al.*, 2005).

O segmento têxtil está entre as oito maiores atividades industriais, desempenhando um papel importante no aspecto socioeconômico do país, porém, sendo o seu potencial poluidor considerado bastante elevado (CERVANTES, *et al.*, 2009).

Uma lavanderia têxtil de médio porte com capacidade para processar 100 mil peças de vestuários, gera em torno de 6 toneladas de lodo seco ou 120 toneladas de lodo com 95% de umidade, anualmente. (NORTEVISUAL, 2008 *apud* DIAS JÚNIOR, 2013).

Os resíduos gerados do tratamento de efluentes das lavanderias são sólidos e líquidos. Os resíduos sólidos, chamado de lodo, é um material semissólido, composto de matéria orgânica e inorgânica, apresenta difícil processo de tratamento e alto custo de disposição final. (MARTINS, 1997).

O lodo, devido aos corantes que contém elementos químicos como chumbo, alumínio, ferro, cobre, quando dispostos no meio ambiente, causam grandes impactos ambientais, como contaminação do solo, águas superficiais como rios, organismos aquáticos, afetando direta ou indiretamente o ser humano (BRAILE e CAVALCANTI, 1993).

A NBR 10.004/2004 (ABNT) classifica este resíduo como sendo de Classe II A, não perigoso e não inerte, sendo passível de aproveitamento.

A disposição deste material em aterros industriais tem sofrido cada vez mais

restrições legais e acompanhados de custos bastante elevados. Dessa forma, uma alternativa é incorporar esse resíduo na cerâmica vermelha, uma vez que, esta incorporação, feita de maneira criteriosa, permite dar um destino ambientalmente correto para resíduos que, de outra forma, seriam fontes de poluição (VIEIRA, 2006).

Este trabalho tem como objetivo investigar o reaproveitamento do lodo de ETE de lavanderia industrial em cerâmica vermelha.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o efeito da incorporação do lodo de ETE de lavanderia industrial em cerâmica vermelha, visando o aproveitamento do resíduo.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar a massa cerâmica e o lodo de ETE de lavanderia industrial em relação a parâmetros físicos, químicos e mineralógicos;
- Fabricar corpos de prova com incorporação nas percentagens de 0(referência); 2,5; 5 e 10% de lodo seco em peso , em relação à massa cerâmica;
- Determinar a influência do resíduo na plasticidade/trabalhabilidade da massa argilosa e nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica;
- Identificar a quantidade de resíduos a ser incorporada na massa cerâmica, sem causar danos aos produtos cerâmicos;
- Determinar a melhor temperatura de queima para a produção de cerâmica;
- Correlacionar a microestrutura das cerâmicas queimadas com as propriedades físicas e mecânicas obtidas;

CAPÍTULO 3

JUSTIFICATIVAS

Como foi visto anteriormente, as lavanderias industriais geram grande quantidade de lodo por ano, que deve ser destinado de maneira adequada a fim de evitar danos ao meio ambiente. Dessa forma, surge a necessidade de buscar alternativas para o aproveitamento ou formas de disposição corretas desse resíduo, a fim de reduzir os danos por ele causados.

Um das melhores alternativas para a destinação final adequada desse resíduo é a incorporação em cerâmica vermelha, visto que pode ocorrer a inertização de substâncias perigosas, reduzindo assim a poluição.

Os benefícios do uso de resíduos como aditivos cerâmicos incluem além da imobilização de metais pesados na matriz queimada, a oxidação da matéria orgânica e a destruição de qualquer organismo patogênico durante o processo de queima (CETESB, 1993). Além disso, a incorporação desse resíduo sólido pode contribuir para o aumento do faturamento financeiro das indústrias, uma vez que o município de Campos dos Goytacazes é um dos maiores produtores de cerâmica vermelha do país, com mais de cem empresas produtoras, as quais geram, mensalmente, cerca de noventa milhões de peças, entre telhas, tijolos e lajotas (RAMOS *et al.*, 2008).

Outras vantagens dessa incorporação são: possibilidade de melhoria no processamento, redução no consumo de lenha, recurso natural renovável e principal combustível utilizado pelas indústrias de cerâmica vermelha, bem como possibilitar a redução do uso de uma matéria-prima não renovável, a argila, e melhorar a qualidade da cerâmica.

Além disso, esse resíduo pode contribuir para ajustar a plasticidade/trabalhabilidade das argilas altamente plásticas de Campos dos Goytacazes.

CAPÍTULO 4

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Indústria têxtil

A indústria têxtil está presente em todos os países por conta de uma necessidade humana de vestuário e usos utilitários variados como, por exemplo, na decoração, na área hospitalar, militar, entre outros. Tem assim um significado importante nas dimensões social, cultural, econômica e política a ponto de influenciar costumes e tendências com consequências no modo de vida em diferentes épocas (FUJITA e JORENTE, 2015).

4.1.1. A indústria têxtil no Brasil

A indústria têxtil constitui um fator de grande importância na economia brasileira e foi implantada no Brasil em caráter industrial após a proclamação da independência em 1822, mais precisamente no período que vai de 1844 até o final da 1ª Guerra Mundial. (OLIVEIRA, 1980 *apud* BITENCOURT, 2002).

Estima-se que em 1882 havia no Brasil cerca de 48 fábricas produzindo 20 milhões de metros de tecido anualmente, este número viria a aumentar nos próximos anos para 134 estabelecimentos espalhados por 17 estados do país (FUJITA e JORENTE, 2015).

Em valores monetários, o setor têxtil brasileiro faturou em 2010, cerca de US\$ 60 bilhões, com 78% de sua produção concentrada na região Sudeste. Segundo dados da Associação Brasileira de Indústrias Têxteis (ABIT), hoje o Brasil é o quinto maior produtor têxtil do mundo, são 32 mil empresas em todo país que representa uma indústria pujante e qualificada, que tem investido forte no desenvolvimento de suas técnicas de produção e que responde por aproximadamente 3,5% do PIB total brasileiro. Além disso, esse setor emprega cerca de 1,7 milhão de trabalhadores, o que comprova ser este, um setor de grande relevância para a economia do país e de forte impacto social (SEBRAE, 2015).

O segmento têxtil está entre as oito maiores atividades industriais, desempenhando um papel importante no aspecto socioeconômico do país, porém, sendo o seu potencial poluidor considerado bastante elevado (CERVANTES, *et al.*, 2009).

As indústrias têxteis se caracterizam pela necessidade de utilização de grandes quantidades de água, corantes e produtos químicos, ao longo de uma complexa cadeia produtiva. Isso acarreta a geração de grande quantidade de efluentes altamente poluidores e também de resíduos semi-sólidos (lodo), contendo elevada carga orgânica, cor acentuada e compostos químicos tóxicos ao homem e ao ambiente (HASSEMER, 2006).

Um tipo especial de indústria do setor têxtil que tem surgido recentemente são as lavanderias industriais. Estas realizam etapas de tingimento e lavagem de vestuário da própria produção e/ou de terceiros. Caracterizam-se por pequenas empresas encarregadas de tratamentos finais de roupas e detergentes no beneficiamento das peças, gerando efluentes que necessitam de tratamento antes do lançamento ao ambiente. (HEREK, 2009).

4.1.2. Lavanderia têxtil industrial

As lavanderias, no setor têxtil, surgem como apoio às indústrias de confecção de jeans. Esse tipo de entidade realiza atividades como alvejamento, tingimento, amaciamento, secagem, centrifugação, desengomagem e acabamento. Nestas operações, utiliza-se uma quantidade considerável de água e produtos químicos que podem desencadear sérios danos ambientais, quando não destinados adequadamente (ITABORAHY e SILVA, 2006 *apud* POLLI, 2013).

Os processos realizados em lavanderias industriais têxteis, que realizam o processo de tingimento e lavagem, podem variar de uma lavanderia para outra, em relação a tipos de corante e produtos utilizados nas etapas de processamento de peças (CASTRO, 2010).

O processo das lavanderias industriais inicia-se com o recebimento das roupas já confeccionadas, e termina com a expedição aos clientes das peças lavadas e com características modificadas dos tecidos. Todo o processamento realizado é sequenciado e envolve tratamentos químicos e físicos. (ITABORAHY e SILVA, 2006 *apud* POLLI, 2013). A seguir serão descritos de maneira geral os processos realizados em uma lavanderia industrial.

- Classificação: as peças a serem lavadas são classificadas conforme sua solidez, indicando o tipo de engomagem sofrida no processamento. Elas são

então pesadas e separadas em lotes, de acordo com a capacidade das máquinas de processamento existentes.

- Pré-umectação: facilita a absorção de água do banho por parte dos tecidos, evitando consequentes danificações nas peças. São usados nesta etapa produtos umectantes e antiq uebradura em água (GUARATINI e ZANONI, 2000).
- Desengomagem: as roupas são lavadas em máquinas com produtos químicos para a retirada da goma à base de amido modificado, que os tecidos recebem quando são produzidos. A desengomagem pode ser feita de forma oxidativa e/ou enzimática (GUARATINI e ZANONI, 2000).
- Stonagem: as peças são colocadas nas máquinas de lavar juntamente com as pedras de argila expandida. Nesta fase o tecido sofre um desgaste físico e é preparado para receber os corantes e alvejantes.
- Secagem e centrifugação: as peças passam pelas secadoras e centrífugas para a secagem e retirada dos resíduos das “pedras” e dos restos de tecidos que foram retirados pela stonagem.
- Desbotamento: nesta fase as peças são lavadas com produtos químicos para a retirada da cor original.
- Tingimento: é realizado nas máquinas de lavar para que as peças adquiram a coloração desejada pelos clientes.
- Alveamento: caso os clientes solicitem peças na cor branca, adicionam-se produtos químicos para descolorir os tecidos.
- Neutralização: as peças passam por nova lavagem com produtos químicos para a retirada e neutralização dos produtos químicos utilizados na fase de desbotar, tingimento ou alveamento.
- Ensaboamento: nova lavagem que visa à retirada dos resíduos dos produtos químicos utilizados na neutralização.
- Amaciamento: nova lavagem agora com adição de amaciante para dar sensação de maciez às peças.
- Secagem e centrifugação: as peças são secas em máquinas centrífugas.
- Passamento: com ferros manuais ou prensas a vapor as peças são passadas.
- Expedição: as peças podem ser embaladas ou amarradas em lotes e expedidas aos clientes.

Antes de se realizar os processos citados acima no lote inteiro de roupas, algumas peças, chamadas de peças piloto, são selecionadas e passam por todos os processos descritos acima como teste para serem apresentadas aos clientes para aprovação antes do início da produção em escala. Esta fase se dá em um setor específico da empresa com máquinas destinadas para esta finalidade (ALMEIDA, 2009).

4.1.2.1. Efluente de lavanderia têxtil

As lavanderias têxteis, apresentam como característica, a produção de poluentes em três estados físicos da matéria. No entanto, o efluente líquido gerado por esse ramo industrial, em virtude do grande volume, requer maior atenção, por apresentar grande potencial de danos ao meio ambiente, poluindo, principalmente, os corpos hídricos, das regiões em que atua (HALASZ e TOSATO JR., 2011).

Efluente é a terminologia utilizada para identificar os lançamentos de líquidos provenientes de diversas atividades ou processos (Resolução CONAMA nº 430/2011).

Os efluentes provenientes de lavanderias são caracterizados basicamente pela presença de detergentes, que além dos princípios ativos, podem ter adjuvantes e demais aditivos, tais como polifosfatos, carbonatos, corantes, agentes bactericidas, enzimas (HOAG, 2008), sanitizantes, desinfectantes, umectantes, entre outros, que conferem a esses efluentes o poder de exercer características de menor biodegradabilidade (EMMANUEL *et al.*, 2005). Além disso, a presença dessas substâncias pode ocasionar problemas biológicos nas estações de tratamento, devido principalmente às características recalcitrantes e antibacterianas dessas substâncias. Por essa razão, a nocividade ambiental dos efluentes da lavanderia é acentuada, podendo ainda apresentar riscos aos ecossistemas aquáticos que são expostos a tais compostos (FEITOSA *et al.*, 2015).

Segundo Kunz *et al.* (2002) a indústria têxtil é responsável pela geração de muitos efluentes com elevadas intensidades de cor, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos (SS) e baixas concentrações de oxigênio dissolvido (OD). Dentre outras espécies químicas presente no meio, especial atenção tem sido dada aos corantes reativos utilizados na etapa de tingimento, principalmente em função da sua elevada toxicidade e resistência ao ataque microbiano.

A extrema diversidade de matérias-primas e de processos de produção empregados pela indústria têxtil causa alguns problemas na caracterização dos efluentes e, conseqüentemente, na definição de controle da poluição. (HEREK, 2009).

A composição de um efluente misto em uma indústria têxtil apresenta as seguintes características (ROTT e MINKE, 1999 *apud* RIBEIRO, 2001):

- Cor intensa, devido à grande quantidade de corantes não fixados.
- Concentração de matéria orgânica equivalente ao esgoto doméstico.
- Grande Demanda Química de Oxigênio (DQO) refratária devido a corantes de alta massa molecular.
- Altas concentrações de Haletos Orgânicos Adsorvíveis (AOX), sulfitos e metais pesados por causa de alvejantes e halogênios, enxofre ou metal pesado que estejam contidos muitas vezes nos corantes.
- Altas concentrações de sólidos em suspensão, o que provoca um considerável aumento da turbidez do efluente (COLLINS, 1989 *apud* HALASZ e TOSATO, 2011).

Os efluentes líquidos gerados passam por uma série de tratamentos físicos, biológicos e químicos, para que o efluente final do tratamento apresente características determinadas pelos órgãos ambientais, para que se possa lançá-los em corpos d'água (CASTRO, 2010).

4.1.2.2. Tratamento de efluente de lavanderia industrial

Os processos de tratamento de efluentes são dimensionados para atender os padrões de exigência da legislação aplicada, resolução 430, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Diversos métodos ou etapas podem ser empregados para atingir tais padrões. (Tchobanoglous *et al.*, 2003 *apud* BUSS *et al.*, 2015).

Segundo Carmo (2001) os efluentes gerados deveriam passar por tratamento preliminar, que envolve tratamento físico-químico, seguido, posteriormente de tratamento biológico, antes do descarte na rede pública e/ou em cursos d'água.

Segundo a HG Engenharia (2008), as etapas de tratamento do efluente que é gerado na lavanderia industrial, são:

- Tratamento pelas caixas de areia ou gradeamento: as caixas de areia possuem um desnível no fundo e trabalham em série com propósito de decantar a máxima quantidade de areia do efluente.

- Tanque de decantação primária: o efluente bombeado para este tanque passa por mais um estágio de decantação da areia, em seguida por gravidade, escoando para uma peneira autolimpante, onde são retirados sólidos grosseiros como restos de fibra de tecido, plásticos e outros materiais contidos no efluente.
- Tanque de equalização por transbordo ou homogeneizador: estabiliza a vazão e homogeniza o efluente com o propósito de manter uniforme as suas características para o tratamento posterior. Além disso, ajusta o pH.
- Tanque de aeração ou mistura rápida: há a biodegradação da matéria orgânica, transformando-a em substâncias mais simples como água, gás carbônico (CO₂) e sais, gerando o lodo.
- Decantadores: ocorre a remoção de turbidez, eliminação de parte da carga orgânica e decantação do lodo. O lodo acumulado no fundo dos decantadores é diretamente recirculado ao tanque de aeração. A outra parte é transferida para o adensador de lodo para que a partir deste, seja feito o descarte. O lodo descartado é armazenado na caixa de lodo biológico para, posteriormente, ser encaminhado aos leitos de secagem.
- A água que transborda dos decantadores passa por medidores de vazão, e então é encaminhada para uma segunda etapa do tratamento, chamada de tratamento físico-químico, onde a cor que é um sólido solúvel ou coloidal é retirada na etapa de coagulação/floculação e posterior decantação.
- O sobrenadante, ou seja, o líquido clarificado do decantador passa então para as lagoas de tratamento (tratamento secundário). A função desse tratamento é a remoção da matéria orgânica solúvel (BITENCOURT, 2002).
- Feito isso, o líquido tratado é despejado em corpos hídricos próximos à lavanderia.

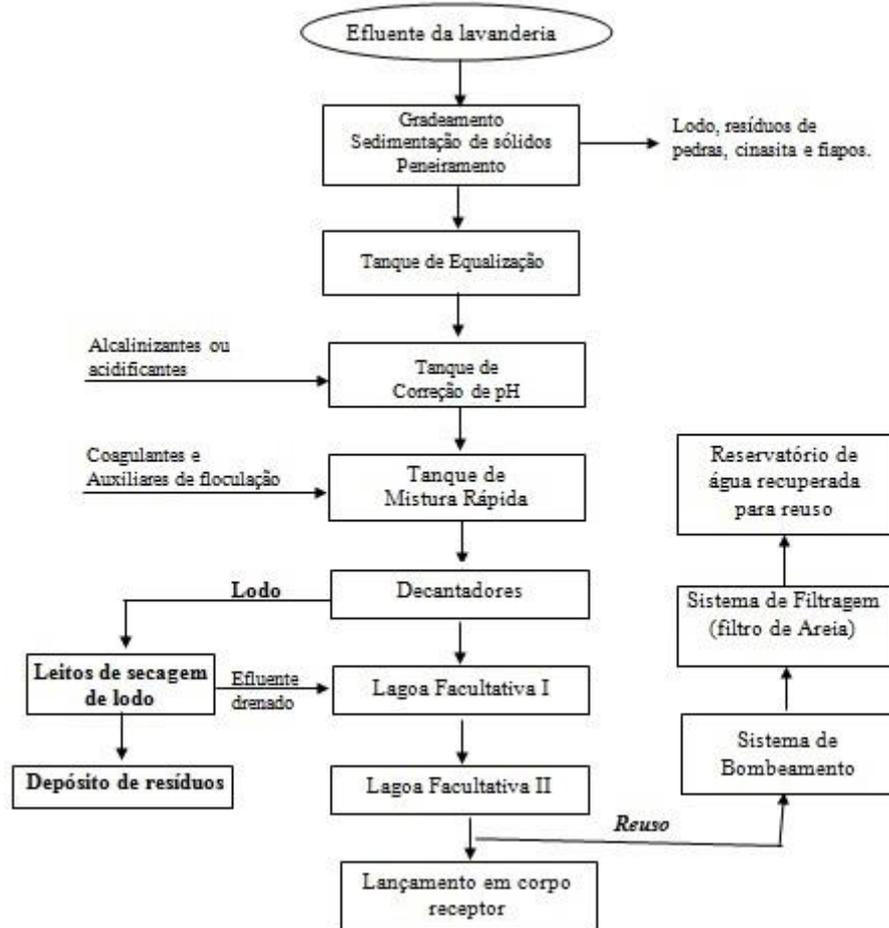


Figura 4.1 - Fluxograma geral do processo de tratamento do efluente de uma lavanderia industrial têxtil. (FONTE: CASTRO, 2010).

Em geral, na indústria têxtil, os processos de tratamento estão fundamentados na operação de sistemas físico-químicos de precipitação-coagulação, seguidos de tratamento biológico via sistema de lodos ativados. O sistema apresenta uma eficiência relativamente alta, permitindo a remoção de aproximadamente 80% da carga de corantes.

As lavanderias industriais são fontes geradoras de efluentes líquidos, que após tratamento por floculação/coagulação, produzem lodo. A quantidade de lodo gerada está relacionada com a eficiência do tratamento utilizado. Nestes lodos há a presença de metais pesados e outros componentes tóxicos. A poluição do ambiente pelos metais pesados é extremamente perigosa porque estes materiais são ambientalmente persistentes, tóxicos e solúveis em água (CASTRO, 2010; MARTINS, 1997 *apud* ALMEIDA, 2009).

4.1.2.3. Lodo de ETE de Lavanderia Industrial

O resíduo gerado no setor de tratamento de efluentes de lavanderias industriais possui características de resíduo classificado como Classe II, não perigoso, segundo a NBR 10.004/2004 da ABNT.

O lodo de lavanderia industrial gerado no processo de decantação apresenta uma composição química complexa, pois os materiais utilizados no processo de lavagem, tingimento e tratamento do efluente líquido estão presentes em sua constituição (BITENCOURT, 2002 *apud* CASTRO, 2010). Ou seja, sua composição química pode variar em função de sua origem e do sistema de tratamento empregado (BETTIOL e FERNANDES, 2004 *apud* DINIZ e MENESES, 2016).

Este resíduo é considerado um material semissólido, composto de matéria orgânica e inorgânica, rico em metais pesados e outros componentes, dentre os quais estão o alumínio, ferro, manganês, titânio, silício, sódio, cálcio, magnésio, fósforo, carbono total, carbono orgânico e cloretos.

O lodo apresenta difícil processo de tratamento e alto custo de destinação, representando até 60% dos custos operacionais de uma unidade de tratamento de efluentes (PRIM, 1998 *apud* KAMINATA, 2008).

Quando não tratado e descartado em lugares impróprios, o lodo pode causar grandes impactos ambientais, tais como contaminação do solo, de águas superficiais, de organismos aquáticos, afetando direta ou indiretamente o ser humano (BRAILE e CAVALCANTI, 1993).

Com relação ao destino final adequado do lodo, vêm sendo desenvolvidos estudos no sentido de sua valorização, como matéria prima secundária na produção de um material utilizável, com características que atendam os parâmetros exigidos e sem prejuízo ao ambiente. (POLLI, 2013).

4.2. Resíduos sólidos

Com a Revolução Industrial e os avanços tecnológicos, a produção de resíduos sólidos cresceu muito, pois foi preferida a facilidade de possuir produtos que poderiam ser descartados após seu uso, mas não foi pensado o destino correto para o descarte do mesmo (MARCHI, 2011).

Esses resíduos passam a ser descartados e acumulados no meio ambiente causando não somente problemas de poluição, como caracterizando um desperdício da matéria originalmente utilizada. (COMPAM, 2006).

4.2.1. Definição

De acordo com a norma técnica NBR 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) os resíduos sólidos podem ser definidos como:

“resíduos no estado 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”.

Esta definição agrupa tanto resíduos sólidos urbanos, quanto lodos de Estação de Tratamento de águas (ETAs) e lodos de Estação de Tratamento de Efluentes (ETEs).

4.2.2. Classificação

Como pode ser observado no fluxograma da Figura 4.2, o processo de classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de suas características e constituintes (substâncias), cujo impacto à saúde e ao ambiente é conhecido (ABNT NBR 10004/2004).

Segundo a norma NBR 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, (ABNT), os resíduos são classificados em:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II - Não perigosos;
 - resíduos classe II A - Não inertes;
 - resíduos classe II B - Inertes.

a) Resíduos classe I – Perigosos: são aqueles que quando gerenciados de forma inadequada, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública, riscos ao meio ambiente, ou seja, são todos aqueles que apresentam periculosidade.

Os resíduos para serem considerados perigosos devem apresentar pelo menos uma das seguintes características:

- 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.

As principais fontes específicas de resíduos perigosos são: pigmentos inorgânicos, pesticidas, explosivos, refino de petróleo, ferro-ligas, produtos siderúrgicos, fabricação de tintas, produtos farmacêuticos, veterinários, coqueificação, indústria coureira e calçadista (ABNT, 2004).

b) Resíduos classe II – Não perigosos: são aqueles que não apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, ou seja não apresentam características de periculosidade.

Alguns exemplos são: resíduos de restaurantes, como restos de alimentos; resíduos de madeira; resíduos de materiais têxteis, sucata de metais ferrosos e não-ferrosos, resíduos de papel e papelão, entre outros.

- Classe II A – Não inertes: possuem constituintes que podem ser solubilizados em água, podendo ter propriedades como combustividade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Classe II B – Inertes: resíduos que quando ensaiados de acordo com as normas técnicas, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da NBR 10004:2004.

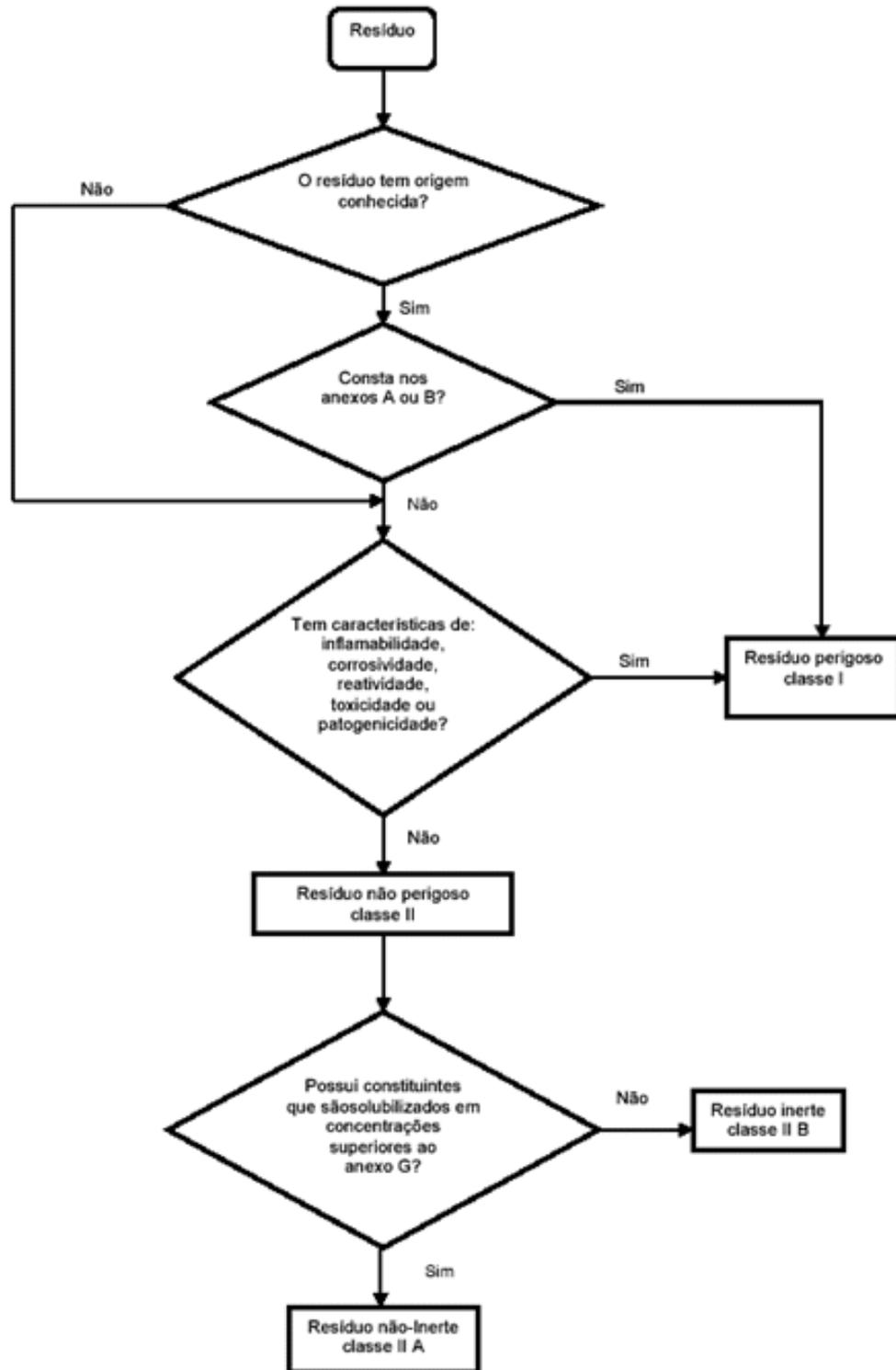


Figura 4.2- Fluxograma para classificação dos resíduos sólidos de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004)

Segundo o Artigo 13 da Lei 12305 (2010), os resíduos sólidos podem ser agrupados, quanto a sua origem, nas seguintes classes:

- resíduos domiciliares: gerados em atividades domésticas em residências urbanas;
- resíduos de limpeza urbana: originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: gerados nessas atividades, cujas características dependem da atividade ali desenvolvida.
- resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: originários nessas atividades.
- resíduos industriais: gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- resíduos de serviços de saúde: gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- resíduos da construção civil: gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- resíduos agrossilvopastoris: gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- resíduos de serviços de transportes: originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- resíduos de mineração: gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

4.2.3. Resíduos sólidos industriais

Os resíduos industriais são aqueles gerados nas atividades de diversos ramos da indústria, tais como alimentícia, metalúrgica, petroquímica, química, entre outros. Assim, os resíduos industriais são bastante variados, uma vez que são gerados por diferentes processos, podendo ser representados por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, metais, escórias, vidros, cerâmicas, entre outros (D'ALMEIDA e VILHENA, 2000).

Dessa forma, é necessário distinguir os resíduos sólidos industriais, uma vez que cada resíduo, de acordo com a sua composição, apresenta características especiais de acondicionamento, coleta, transporte e destinação final (PRIM, 1998 *apud* Oliveira, 2003). Os geradores são responsáveis e obrigados a cuidar de todo o resíduo produzido (CASTRO, 2010).

Devido à forma de coleta e destinação final, os resíduos sólidos industriais são responsáveis pela maior parte da contaminação do solo, do ar e dos recursos hídricos nos grandes centros urbanos. Assim, são muitos os riscos que a destinação inadequada do resíduo oferece, pois estão ligados a processos naturais que, na maioria dos casos, estão fora da esfera de controle do homem, como a lixiviação, percolação, evaporação, ciclo das chuvas, combustão, fumaça, e vetores (LIMA, 1995).

Assim, como são gerados diariamente uma grande quantidade desses resíduos, pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de obter formas de aproveitá-los, sendo como subprodutos industriais ou até mesmo reutilizando-os, permitindo assim minimizar a construção de mais aterros industriais. Isso é muito importante, visto que a produção de resíduos pode representar, além de problemas ambientais, uma perda de matéria e energia. Esta estratégia permite, em geral, a diminuição de custos de gestão e tratamento de resíduos; a redução de riscos de contaminação e acidentes, além de reduzir os custos de produção devido à melhor gestão dos materiais e eficiência do processo (SCHEUNEMANN, 2005).

As indústrias têxteis, em especial as lavanderias industriais têxteis, são um dos setores que geram grandes quantidades de resíduos atualmente, sendo que um dos principais e mais problemáticos resíduos gerados neste ramo são os lodos provenientes dos sistemas de tratamento dos efluentes (ETEs), visto que apresentam metais pesados em sua composição (HEREK, 2009).

4.3. Reciclagem e tratamentos de resíduos

O meio ambiente vem sofrendo agressões de diversas formas devido ao processo de desenvolvimento em que o mundo se encontra. É visível o descaso da sociedade em relação ao ambiente em que vivemos. As formas mais comuns de agressões ao meio ambiente são o uso excessivo de recursos naturais e a poluição do meio ambiente. Sendo assim, é evidente a relevância de práticas sustentáveis, tanto sociais como industriais (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Atualmente, tem-se motivado nos setores industriais o reaproveitamento adequado de resíduos sólidos industriais recicláveis através do gerenciamento nas centrais de tratamento de resíduos, gerando desta forma a preservação dos recursos naturais (NANI, 2012 *apud* SANTOS *et al.*, 2016).

Os saldos positivos ambientais perante os processos de reciclagem são indiscutíveis, pois a cada resíduo aproveitado se terá economia de energia, água e extração de matéria prima natural (SANTOS *et al.*, 2016).

A escassez de recursos hídricos e a cobrança pelo uso da água têm estimulado a prática de reuso nas indústrias têxteis e lavanderias. Muitas são as pesquisas que envolvem o descarte dos resíduos sólidos dos segmentos industriais, dessa forma vários tratamentos estão disponíveis atualmente (DINIS e MENESES, 2016).

Segundo Gomes (2003) define-se por “tratamento de resíduos sólidos” qualquer processo que altere as características, composição ou propriedades do resíduo, de maneira a tornar menos impactante sua disposição final no solo, ou simplesmente sua destruição.

Os métodos de tratamento de resíduos podem envolver uma ou mais das seguintes formas de processamento:

- Conversão dos constituintes agressivos em formas menos perigosas ou insolúveis;
- Destruição química dos produtos indesejáveis;
- Separação da massa de resíduos dos constituintes perigosos, com a consequente redução do volume a ser disposto;
- Alteração da estrutura química de determinados produtos, tornando mais fácil sua assimilação pelo ambiente.

Segundo Herek (2009) e Castro (2010), as principais alternativas mais utilizadas como destinação final do lodo industrial são:

- Secagem e desidratação;
- Aterro industrial;
- Compostagem;
- Incineração;
- Landfarming;
- Solidificação/Estabilização;
- Incorporação em indústria cerâmica.

4.3.1. Secagem e desidratação

Os lodos gerados nos diversos processos industriais resultantes de operações, tais como filtração, decantação, destilação, armazenamento, entre outras, e nas instalações de tratamento de efluentes líquidos ou gasosos apresentam um teor de umidade alto, frequentemente superior a 90 ou 95% (CETESB, 1993 *apud* PINTO, 2004). Por isso faz-se necessário realizar os tratamentos de secagem e desidratação, que tem como objetivo principal remover a água, que é o principal veículo de disseminação de poluentes que se encontram agregados aos resíduos.

A secagem tem como objetivo primário evaporar a água presente no lodo, dessa forma os constituintes líquidos evaporam como uma consequência do calor aplicado. Na secagem, a taxa na qual ocorre a evaporação do líquido depende da condutividade térmica do resíduo sólido a ser seco e dos pontos de ebulição dos constituintes líquidos voláteis a serem evaporados (LIMA JR, 2001 *apud* KAMINATA, 2008).

A desidratação é a retirada da umidade presente no lodo e pode ser feita por transferência de calor ou secagem por processos físicos, como por exemplo, a prensagem.

Segundo CETESB (1993), os métodos mais comumente utilizados para secagem e desidratação de lodos são: centrifugação, filtragem em filtros-prensa de placas, filtragem em filtros-prensa em cinto, filtragem a vácuo e leitos de secagem.

Os equipamentos mecânicos de filtração funcionam simplificadaamente pela retenção das partículas sólidas em um anteparo perfurado colocado contra um fluxo de resíduo artificialmente mantido pela aplicação de uma força externa.

Já nos leitos de secagem a desidratação do lodo se dá por evaporação e pela passagem do líquido através de um leito filtrante (CASTRO, 2010).

Em consequência do aumento da demanda de produtos industrializados, atualmente, a secagem do lodo gerado no processo industrial tem como principal objetivo, a eliminação máxima da água incorporada no resíduo, reduzindo o custo de transporte para o aterro industrial (KAMINATA, 2008).

4.3.2 Aterro industrial

Define-se aterro industrial como a técnica de disposição final de resíduos sólidos industriais em áreas planejadas com terreno impermeabilizado, para

minimizar o risco de degradação ambiental e à saúde pública. Os aterros para resíduos industriais são obras de disposição final, menos onerosa e de tecnologias mais conhecidas no Brasil (CASTRO, 2010; KAMINATA, 2008).

Para os aterros industriais é importante que não haja riscos nem danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, utilizando princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores, se necessário (NBR 842/1983).

É fundamental para escolha do tipo de aterro, o conhecimento dos resíduos sólidos a serem dispostos, isto é, sua quantificação, qualificação e periculosidade. Existem os seguintes tipos de aterros industriais: industrial classe I para resíduos perigosos, e industrial classe II para resíduos não perigosos. (D'ALMEIDA e VILHENA, 2000).

Os aterros não servem para disposição de todos os tipos de resíduos industriais, sendo passíveis de disposição em aterro os resíduos cujos poluentes neles contidos podem sofrer alguma forma de atenuação no solo, seja por processo de degradação, seja por processos de retenção (filtração, adsorção, troca iônica etc.). Os resíduos inflamáveis, reativos, oleosos, orgânicos persistentes ou que contenham líquidos livres não devem ser dispostos em aterros (CETESB, 1993; MENDES, 1998).

Os resíduos com baixo teor de umidade são os mais apropriados para se dispor em aterros industriais. Matérias com alto teor de umidade criam problemas pela formação de percolados devido à liberação da fase líquida. Lodos industriais apresentam alto teor de umidade sendo necessário secá-los antes de enviá-los ao aterro (ROSA, 2004).

Os aterros industriais apresentam algumas restrições: constituem um processo extensivo que exige grande área para implantação, e não resolvem necessariamente o problema de toxidez dos resíduos que continuam potencialmente perigosos, além de terem um custo alto para indústria geradora de lodo (NEIL et al., 1997; MENDES, 1998).

A disposição do lodo de lavanderias industriais em aterros industriais, além de estar sofrendo cada vez mais restrições legais, vem acompanhada de custos bastante elevados.

4.3.3 Compostagem

Segundo a NBR 13.591/1996, compostagem é o processo de decomposição biológica da fração orgânica biodegradável dos resíduos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições controladas de aerobiose e demais parâmetros, desenvolvido em duas etapas distintas: uma de degradação ativa e outra de maturação.

Segundo Carvalho (2011), o processo de compostagem corresponde a um processo biológico, no qual é possível se identificar vários grupos de microrganismos que decompõem em substrato orgânico, sendo resultante disto, a água, dióxido de carbono, matéria orgânica maturada e calor.

Inúmeros são os benefícios promovidos para o solo ao utilizar o lodo têxtil como insumo agrícola, a exemplo do aumento da matéria orgânica, fechamento do ciclo biogeoquímico dos nutrientes minerais, fornecimento de micro e macro nutrientes, aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), maior complexação de elementos tóxicos, melhoria da estrutura, maior infiltração, maior capacidade de retenção de água no solo, resistência à erosão e redução de uso de fertilizantes minerais. (SIMONETE, 2001 ; ROCHA *et al.*, 2004; DINIS e MENESES, 2016).

Todo o processo envolve transformações extremamente complexas de natureza bioquímica, realizadas por milhões de microrganismos do solo que têm na matéria orgânica *in natura* sua fonte de energia, nutrientes minerais e carbono. O emprego de compostos orgânicos em uma propriedade rural é uma forma de reduzir o uso de insumos industrializados, priorizando os recursos naturais (EMBRAPA, 2006 *apud* ALMEIDA, 2009).

4.3.4. Incineração

A incineração é o processo de tratamento mais utilizado na destruição de resíduos perigosos. É recomendado para resíduos perigosos que não podem ser reciclados, reduzidos ou dispostos de maneira segura em um aterro (HEREK, 2009).

De acordo com a norma NBR 11.175/1990 da ABNT, define-se incineração como sendo o processo de oxidação a alta temperatura, que destrói ou reduz o volume ou recupera materiais ou substâncias.

Segundo Castro (2010), a incineração é um processo de combustão controlada (em instalação própria), que permite a redução em volume e em peso,

dos resíduos sólidos, em cerca de 90 e 60%, respectivamente, com a finalidade principal de eliminar resíduos tóxicos orgânicos a temperaturas que variam entre 800 e 3000°C.

Normalmente, o calor requerido para a incineração é oriundo da oxidação das ligações orgânicas de carbono e hidrogênio que existem no interior do resíduo ou combustível, desta forma ocorrem reações com o oxigênio, gerando gás carbônico, água e calor. A incineração é eficiente com resíduos orgânicos, contudo não é capaz de destruir compostos inorgânicos e metais agregados a resíduos sólidos (MANAHAN, 1994 *apud* KAMINATA, 2008).

Dentre os benefícios da incineração de resíduos, destacam-se: a redução do volume requerido para disposição em aterros e a recuperação de energia durante a combustão podendo ser utilizada para a produção de eletricidade ou combinado calor e energia. Já para os municípios que adotarem essa técnica, os benefícios serão ainda maiores, pois os gastos com a implantação e a operação de aterros sanitários seriam quase que totalmente evitados, as distâncias percorridas pelos caminhões de coleta seriam reduzidas, além de melhorar o tráfego urbano. (QUEZADO, 2010).

Em contraponto, Gutberlet (2011) e Prim (1998) apontam diversos impactos negativos da incineração que precisam ser considerados na discussão do seu uso. Entre outros se destacam: a liberação de gases tóxicos da combustão de resíduos e produção de elevado volume de cinzas tóxicas resultante da incineração, poluição da água pelas águas de arrefecimento das escórias e o elevado custo de investimento.

Ainda no que se refere às desvantagens da incineração de resíduos, o Greenpeace (2011) alerta que "as populações próximas a incineradores estão potencialmente expostas a certos compostos através da inalação do ar ou consumo de produtos agrícolas contaminados (como legumes, ovos e leite)", podendo essa contaminação ocorrer também através do contato da pele com o solo contaminado.

Sendo assim, do ponto de vista técnico, sobretudo econômico, recomenda-se que a incineração seja feita para resíduos sem alternativas de outros tratamentos mais seguros (KIMINATA, 2008).

4.3.5. Landfarming

O *landfarming* é uma tecnologia de biorremediação na qual os resíduos são espalhados e misturados à camada reativa do solo, de forma controlada, a fim de que a própria microbiota do solo atue como agente de degradação. O processo é realizado em grandes áreas, já que a biodegradação se dá na camada superior do solo, onde a aerobiose é garantida. Os hidrocarbonetos no solo podem sofrer volatilização e biodegradação (MPHEKGO e CLOETE, 2004 *apud* SILVA, 2009).

Este sistema consiste na destinação controlada, mediante taxas de aplicação definidas, num solo receptor, de um resíduo orgânico e sua mistura, homogênea, com a camada fértil (de 15 a 20 cm da camada superior). Isso facilita o acesso dos microrganismos do solo à camada oleosa e permite a aeração da mistura.

O sistema *landfarming* não requer barreiras físicas, como mantas impermeabilizantes para isolar os constituintes perigosos. Isso é possível, pois o solo funciona como um atenuador dos processos de migração e lixiviação dos constituintes perigosos (ALMEIDA, 2009).

Para que este processo apresente a eficiência requerida, faz-se necessário a adição de nutrientes, especialmente fósforo, nitrogênio e potássio, pois o aumento da concentração de carbono orgânico no solo aumenta a demanda de nutrientes pelos microrganismos (PAUDYN *et al.*, 2007). Além disso, podem ser feitas outras adequações no solo que incluem a adição de água para aumentar a umidade, e a adição de óxidos de cálcio e/ou magnésio para corrigir o pH. Em geral, ocorre maior degradação de hidrocarbonetos em solo de pH neutro, pois as bactérias são reconhecidas como principais agentes da biodegradação (MPHEKGO e CLOETE, 2004)

O *Landfarming* é realizado em células operadas em ciclos regenerativos do solo, estimados em um ano. Após o último ciclo de degradação é feito o plantio da cobertura vegetal, evitando-se assim a erosão do solo.

O *Landfarming* é um processo de tratamento em desuso, sendo substituído gradativamente por métodos alternativos e eficazes com baixo custo de implantação (ALMEIDA, 2009).

4.3.6. Solidificação/Estabilização

A estabilização consiste em um estágio pelo qual os constituintes perigosos de um resíduo são transformados e mantidos nas suas formas menos solúveis ou menos tóxicas, ou seja, numa forma quimicamente mais estável. Tais transformações se dão por meio de reações químicas que fixam elementos ou compostos tóxicos em polímeros impermeáveis ou em cristais estáveis. Quanto às características físicas do resíduo, estas podem ou não ser alteradas e melhoradas. (CETESB, 1993 *apud* CASTRO, 2010).

Os processos de solidificação e estabilização são métodos não destrutivos de imobilizar os constituintes perigosos presentes em um resíduo. Isto porque eles não removem ou reduzem a quantidade desses constituintes. Caracteristicamente, esses processos adsorvem, encapsulam ou mudam a forma físico-química do poluente no resíduo, resultando em um produto menos lixiviável (SILVA, 2007).

Na aplicação dessa tecnologia vários agentes podem ser utilizados: cal, cimento, polímeros orgânicos, materiais termoplásticos, materiais absorventes, materiais cerâmicos, além do processo de vitrificação (HEREK, 2009).

Dessa forma, os processos de solidificação e estabilização são divididos em dois grupos: inorgânicos e orgânicos. Os processos inorgânicos com cimento e pozolanas têm sido utilizados com mais frequência. Os processos orgânicos com termoplásticos, polímeros orgânicos têm sido aplicados para resíduos específicos (BARTH e PERCIN, 1990; KAMINATA, 2008).

Essa técnica tem como objetivo reduzir a mobilidade e solubilidade do contaminante, melhorar as características físicas e de manuseio dos resíduos, produzindo um sólido sem líquido livre, melhorar a integridade estrutural e diminuir a área superficial por meio da qual possa ocorrer a transferência ou perda de poluentes (MIRANDA *et al.* 2017).

A eficiência desse tratamento é normalmente determinada por meio do teste de lixiviação. Com o ensaio de lixiviação, se determina a estabilidade química e o potencial poluidor de uma matriz contendo contaminantes. A lixivialidade é calculada expondo o resíduo tratado ou não a uma solução com características conhecidas para determinar o grau de dissolução dos contaminantes (BRITO, 2006).

A tecnologia de solidificação e estabilização vem se tornando uma importante alternativa de tratamento face às normas para disposição de resíduos perigosos em aterro, cada vez mais restritas, pois provê o melhoramento das características físicas

e toxicológicas de resíduos considerados intratáveis, facilitando o gerenciamento de forma segura e eficaz. Além disso, o custo desse processo tem sido considerado baixo em relação a outras técnicas de tratamento, fator esse que tem impulsionado o desenvolvimento desta tecnologia nos últimos anos, e ainda, permite o tratamento de resíduos sólidos e líquidos (HEREK, 2009).

4.3.7 Incorporação de resíduos em cerâmica vermelha

Dentro da indústria cerâmica, a cerâmica vermelha é a área que consegue absorver as maiores quantidades de resíduos provenientes de diversos setores industriais. Estes resíduos são oriundos da: construção civil, indústria vidreira, indústria têxtil, indústria de papel, indústria de curtume, processamento de granito e mármore, indústria siderúrgica e também da própria indústria cerâmica (MORAIS, 2013).

A incorporação de resíduos industriais em cerâmica vermelha vem sendo muito utilizada na busca de matérias primas alternativas, e também buscando uma destinação ambientalmente correta aos resíduos (BABISK *et al.*, 2012 *apud* BARROS, 2015).

Segundo Dondi *et al.* (1997), alguns tipos de resíduos podem melhorar o processamento e a qualidade da cerâmica. Ainda de acordo com os autores, os tipos de resíduos quanto a sua incorporação em cerâmica vermelha são: resíduos combustíveis; cinzas; resíduos fundentes e resíduos redutores de plasticidade e plastificantes.

A seguir apresenta-se de forma mais detalhada a classificação sugerida por Dondi *et al.* (1997):

- 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, ocasionado um aumento da porosidade do material após o processo de queima.

- Cinzas: 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: 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: materiais que, quando adicionados às massas cerâmicas, provocam alteração 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 as 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: apresentam alto poder calorífico devido à elevada concentração de 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: 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 tornou 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.

Segundo Souza (2007), as indústrias cerâmicas estão entre as que mais reciclam resíduos urbanos e industriais em consequência de sua grande produção, o que facilita a incorporação dos mesmos. Assim sendo, alguns tipos de resíduos podem melhorar o processamento e a qualidade da cerâmica.

As argilas utilizadas na indústria cerâmica tradicional são de natureza heterogênea, geralmente constituídas de materiais plásticos e não-plásticos, com um vasto espectro de composições, motivo pelo qual permitem a presença de materiais residuais de vários tipos, com pequenas variações na propriedade do produto final (RAMOS, 2009).

Segundo Vieira et al (2007), a incorporação de resíduos de atividades industriais em produtos cerâmicos é uma tecnologia alternativa para reduzir impactos ambientais, como destruição de paisagem, fauna e flora causada por sua disposição indiscriminada. Também consistem numa forma de reciclagem de matérias atendendo exigências de órgãos ambientais.

O uso desta técnica promove uma redução na quantidade de resíduos a serem dispostos e por outro lado constitui-se em uma fonte alternativa de matéria-prima de baixo custo para a indústria cerâmica. Contudo, tais processos devem vir sempre acompanhados de uma avaliação ambiental devido a possíveis impactos provenientes tanto da produção como da utilização deste material (OLIVEIRA, 2003).

4.4. Argila

O termo argila é empregado para designar um material inorgânico natural, de granulometria fina, com partículas de poucos micrômetros, que geralmente apresenta comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água. Quimicamente, as argilas são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Do ponto de vista sedimentológico e granulométrico, a fração argila corresponde ao conjunto de partículas inferiores a 2 μm ou 4 μm , segundo as escalas de Attenberg e Wentwork, respectivamente (HEREK, 2009; SANTOS, 1989).

Segundo Santos (1989), argila é uma rocha finamente dividida, constituída essencialmente por argilominerais, podendo conter minerais que não são argilominerais, como: calcita, dolomita, gipsita, quartzo, aluminita, pirita e outros, matéria orgânica e outras impurezas. Os argilominerais são os responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade que as argilas apresentam quando misturadas com uma quantidade conveniente de água.

A plasticidade é uma importante propriedade tecnológica que possibilita o emprego de diversas técnicas de conformação, permitindo a obtenção de peças com formas geométricas das mais variadas, com a resistência mecânica adequada para seu manuseio. Esta é uma das razões para o emprego de argilas em diversos segmentos cerâmicos como os de revestimento, cerâmica vermelha, cerâmica branca, refratários, e outras (MOTTA, 2001). Esta característica é perdida temporariamente pela secagem, e permanentemente pela queima, quando o produto adquire resistência mecânica (MINEROPAR, 2000).

As argilas, na classificação prática da indústria cerâmica, de modo geral são de três tipos: plásticas, chamadas argilas gordas, que são aquelas de alta plasticidade; não plásticas, chamadas de magras; e as de barranco, originárias de uma formação geológica sedimentar. Os dois primeiros tipos são encontrados normalmente em várzeas de rios, sendo transportados ou formados no próprio local em que são encontrados. Na maioria dos casos, encontram-se na mesma jazida argilas de diferentes tipos, sendo diferenciadas segundo a diferença de coloração (MINEROPAR, 2009 *apud* ALMEIDA, 2009).

De acordo com Motta *et al.* (2004) as argilas podem ser classificadas em dois grandes grupos principais, com base na cor de queima (principal característica) e na mineralogia (característica secundária):

- argilas de queima avermelhada: matéria-prima para cerâmica vermelha e estrutural, placas cerâmicas de revestimentos (inclui principalmente os produtos da via seca e, secundariamente, pisos extrudados avermelhados e via úmida), agregado leve, vasos, pote e outras peças utilitárias e de decoração, de corpo avermelhado;
- argilas caulínicas de queima clara: (argilas plásticas e caulim para cerâmica branca), matérias-primas utilizadas em cerâmica sanitária, placas cerâmicas via úmida, porcelana técnica, porcelana e faiança utilitária e artística. Parte dessas argilas pode também ser utilizada na fabricação de refratários sílico-aluminosos.

A argila, por se tratar de um material extremamente fino, muitas vezes de mineralogia mista, torna-se difícil a sua identificação e classificação precisas, propiciando uma farta difusão de terminologia.

4.5. Cerâmica vermelha

Os materiais cerâmicos, que são utilizados desde 4.000 a.C. pelo homem, se destacam pela sua durabilidade, além da abundância da matéria-prima (argila) utilizada. Não se sabe exatamente a época e o local de origem do primeiro tijolo. Possivelmente foram os romanos os primeiros a utilizar o produto, na forma que se conhece hoje, registradas por meio das ruínas desta civilização que dominava o processo de queima da argila (ANICER, 2007 *apud* CASTRO, 2010).

Segundo a ABCERAM, cerâmica vermelha é uma expressão com significado amplo, compreendendo aqueles materiais empregados na construção civil (argila expandida, tijolos, blocos, elementos vazados, lajes, telhas e tubos cerâmicos) e alguns de uso doméstico e afins. Nos dois casos os produtos têm coloração predominantemente avermelhada.

Nesse segmento são relacionados os fabricantes e produtos destinados à construção civil. Estima-se a existência de mais de 6000 indústrias cerâmicas e olarias espalhadas por todo o Brasil, em sua maioria de micro, pequeno e médio portes, operando em vários níveis tecnológicos.

De acordo com a MINEROPAR (2000), a cerâmica vermelha, compreende todos os produtos feitos com matérias-primas argilosas, que após queima apresentam coloração avermelhada. Os produtos deste segmento podem ser subdivididos em cerâmica vermelha de massa porosa que são, por exemplo, os

tijolos, telhas, vasos etc. e em cerâmica vermelha de massa semi vitrificada que são os ladrilhos de piso, lajotas etc., por exemplo.

4.5.1 Pólo Cerâmico na Região de Campos dos Goytacazes

O município fluminense de Campos dos Goytacazes, que está localizado na região Norte do Estado do Rio de Janeiro, tem a maior área da unidade territorial do estado, com aproximadamente 4.026,370 km², e uma população estimada de 487.186 pessoas, em 2016 (IBGE, 2015).

As indústrias cerâmicas de Campos são mais de 100 sindicalizadas, com uma produção estimada de 90 milhões de peças por mês; estando a sua localização concentrada em torno da estrada RJ-216 e arredores. A produção delas é baseada em lajotas para lajes, tijolos e telhas, segundo informações verbais do Sindicato dos Ceramistas de Campos. A produção é basicamente vendida para os mercados do Grande Rio, Sul Fluminense, Zona da Mata Mineira e Espírito Santo (RAMOS *et al.* 2008).

De acordo com o Sindicato da Indústria Cerâmica para Construção de Campos (SICCC), as indústrias cerâmicas de Campos fornecem cerca de 5.000 empregos, respondem por 35% da produção de cerâmica vermelha estadual e geram aproximadamente R\$168 milhões ao ano (MACIEL *et al.*, 2006 *apud* SOUZA *et al.*, 2013).

4.6. Incorporação de lodo de ETE de lavanderia industrial em cerâmica vermelha

A seguir serão apresentados, sucintamente, alguns trabalhos que abordaram a incorporação de lodos de ETE de outras lavanderias para fabricação de cerâmica vermelha.

Aquino *et al.* (2015), utilizaram um lodo (resíduo) e uma massa cerâmica argilosa, que foram doados por uma indústria têxtil e uma indústria de cerâmica vermelha, respectivamente, localizadas na cidade de João Pessoa/PB.

A caracterização das matérias primas foi feita por meio da: análise química, que foi realizada pela espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX), análise mineralógica, que foi realizada por meio do ensaio de difração de raios X (DRX) e análise térmica, por meio dos ensaios de TGA e DTA.

Após a caracterização da massa argilosa e do lodo foram preparadas 6 formulações, as quais foram denominadas de F1 à F6, com 0%, 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em peso de lodo empregado como substituto parcial em uma massa padrão utilizada pela indústria de cerâmica vermelha para fabricação de blocos cerâmicos. Para cada formulação foram confeccionados 18 corpos de prova, totalizando 108.

Feito isso, os corpos de prova foram prensados. Na sequência, os corpos de prova confeccionados, foram queimados utilizando três temperaturas diferentes: 950, 1050 e 1150°C.

Os resultados obtidos na análise química das matérias primas podem ser visualizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultado da análise química do lodo e da massa argilosa. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

| Elementos | Massa Argilosa (%) | Residuo (%) |
|--------------------------------|--------------------|-------------|
| SiO ₂ | 56,12 | 26,64 |
| Al ₂ O ₃ | 18,74 | 0,35 |
| Fe ₂ O ₃ | 7,17 | 0,23 |
| K ₂ O | 2,84 | 0,21 |
| CaO | 2,14 | 4,02 |
| MgO | 1,98 | 2,24 |
| TiO ₂ | 1,06 | 0,06 |
| Na ₂ O | 0,98 | 0,40 |
| P ₂ O ₅ | 0,19 | 1,50 |
| BaO | 0,10 | 0,03 |
| SO ₃ | - | 2,12 |
| Outros | 0,29 | 0,40 |
| PF* | 8,38 | 61,80 |

*PF – Perda ao Fogo

Observando a tabela é possível verificar uma maior quantidade de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ na massa argilosa. A elevada quantidade de Fe₂O₃ proporciona uma coloração avermelhada a massa. O total de óxidos fundentes (K₂O, CaO, MgO e Na₂O) é de 7,94 %. Este resultado aponta que a massa argilosa é apropriada para fabricação de materiais da indústria de cerâmica vermelha, pois esses fundentes presentes, favorecem a queima em temperaturas entre 850°C - 950°C (JÚNIOR *et al.* 2005).

As Figuras 4.3 e 4.4 exibem as curvas obtidas por análise termogravimétrica (TGA) e análise térmica diferencial (DTA) da massa argilosa e do lodo, respectivamente.

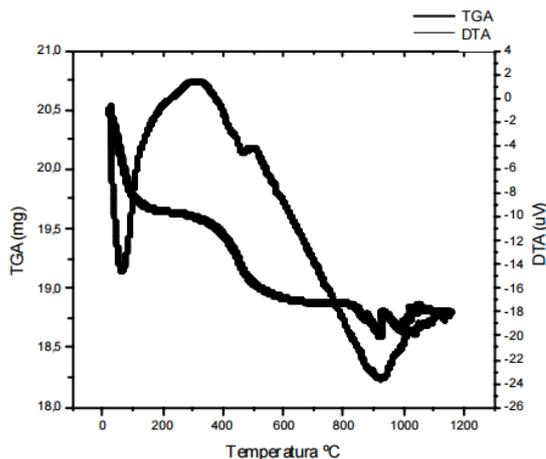


Figura 4.3- Análise termogravimétrica e análise térmica diferencial da massa argilosa. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

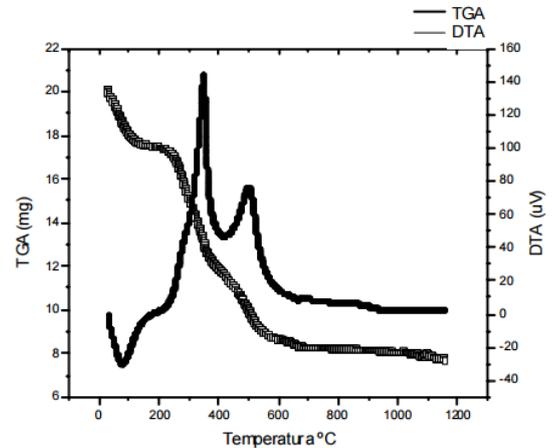


Figura 4.4- Análise termogravimétrica e análise térmica diferencial do lodo. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

Analisando a curva de TG do lodo, Figura 4.4, é possível perceber que a massa inicial apresentou redução logo no início do aquecimento, até aproximadamente 270° C, ocorrendo nesta temperatura, provavelmente, a perda de água higroscópica das partículas argilosas do resíduo, reduzindo a massa de forma muito acentuada até 670° C aproximadamente, havendo, provavelmente, combustão e volatilização da matéria orgânica. Na análise térmica diferencial (DTA), nota-se, em aproximadamente 70°C um pico endotérmico característico da perda de água livre; a 350°C e 500° observa-se picos exotérmicos de grande e média intensidade, respectivamente, associados à combustão de matéria orgânica. Na Figura 4.5 que representa a análise térmica da argila, os picos observados estão, possivelmente, associados à perda de água de umidade e coloidal, presente nas partículas de argila.

Com relação às propriedades tecnológicas de queima a Tabela 4.2, apresenta os resultados da retração linear de queima (RLq) e da perda de massa ao fogo (PF), das formulações após a queima nas temperaturas de 950, 1050 e 1150 °C.

Tabela 4.2- Resultados da análise dos corpos de provas após queima a 950°C, 1050°C e 1150°C. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

| Formulações | 950°C | | 1050°C | | 1150°C | |
|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | RLq (%) | PF (%) | RLq (%) | PF (%) | RLq (%) | PF (%) |
| F1 | 0,23 ± 0,09 | 5,51 ± 0,26 | 1,18 ± 0,14 | 5,87 ± 0,11 | 5,28 ± 0,15 | 6,72 ± 0,26 |
| F2 | -0,16 ± 0,00 | 5,39 ± 0,09 | 0,55 ± 0,08 | 5,99 ± 0,18 | 4,48 ± 0,19 | 7,03 ± 0,14 |
| F3 | -0,10 ± 0,09 | 6,40 ± 0,07 | 0,56 ± 0,09 | 6,99 ± 0,25 | 4,42 ± 0,12 | 7,20 ± 0,28 |
| F4 | -0,16 ± 0,00 | 7,18 ± 0,13 | 0,55 ± 0,08 | 7,24 ± 0,10 | 4,61 ± 0,10 | 7,59 ± 0,10 |
| F5 | -0,08 ± 0,09 | 7,73 ± 0,18 | 0,56 ± 0,09 | 8,36 ± 0,15 | 4,68 ± 0,09 | 8,88 ± 0,11 |
| F6 | 0,19 ± 0,09 | 9,03 ± 0,09 | 1,03 ± 0,08 | 10,49 ± 0,13 | 5,77 ± 0,16 | 10,22 ± 0,14 |

Analisando a tabela foi possível observar, que para a retração linear de queima, o resíduo influenciou fortemente no comportamento do material em todas as temperaturas, diminuindo a retração linear com a adição de lodo até 8% em peso. Este resultado está coerente com a análise química dos materiais, sendo o resíduo um material com um teor elevado de SiO₂ responsável pela diminuição da retração. No entanto, não foi possível justificar o aumento da retração para a formulação F6 para todas as temperaturas, com 10% de lodo.

Em relação à perda ao fogo, verificou-se um maior valor na F6 para todas as temperaturas de queima, isso porque, como apresentado anteriormente nas curvas termogravimétricas (Figuras 4.3 e 4.4), o lodo perde mais massa com a temperatura do que a massa argilosa. Com isso, quanto maior o percentual de lodo na formulação, maior será a porcentagem de perda de massa.

O aumento da perda de massa com o aumento da quantidade de resíduo influenciou também na absorção de água do material, conforme pode ser observado nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

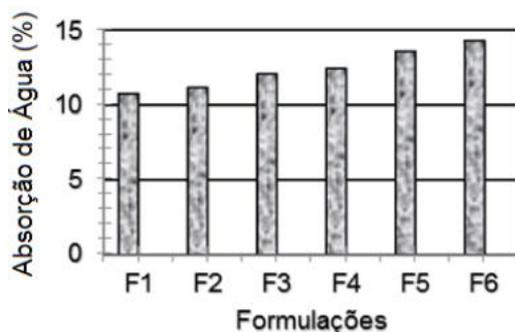


Figura 4.5- Absorção de água das formulações a 950°C. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

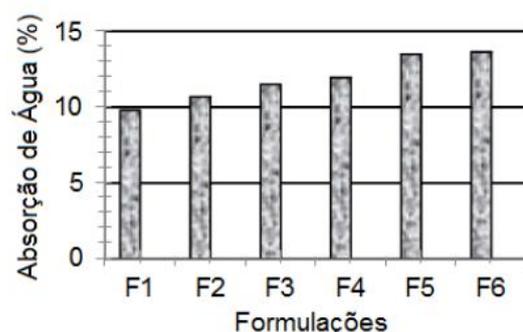


Figura 4.6- Absorção de água das formulações a 1050°C. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

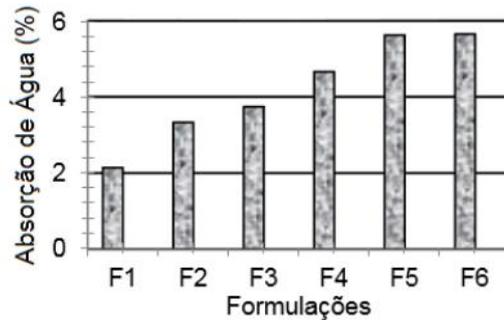


Figura 4.7- Absorção de água das formulações a 1150°C. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

As Figuras mostram claramente que a porcentagem de absorção de água para todas as temperaturas de queima, a qual está diretamente relacionada com o índice de vazios do material, é maior com o aumento do percentual (%) de substituição, podendo existir mais porosidade no material. Dessa forma, nota-se que quanto maior a quantidade de lodo adicionado à massa argilosa, mais poroso será o material. Conseqüentemente maior será o número de concentradores de tensão que fragiliza a peça, diminuindo a resistência à ruptura com o aumento do teor de resíduo, conforme pode ser observado nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

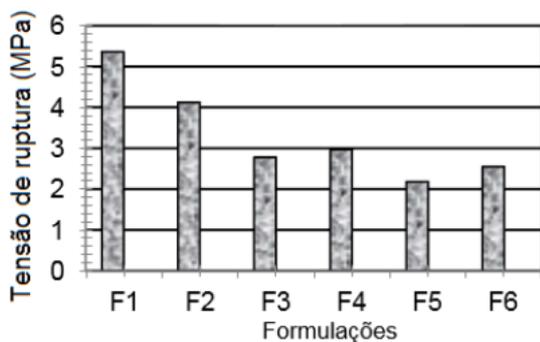


Figura 4.8- Tensão de ruptura a flexão das formulações a 950°C. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

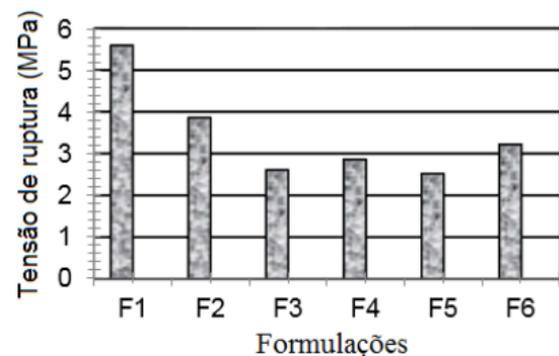


Figura 4.9- Tensão de ruptura a flexão das formulações a 1050°C. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

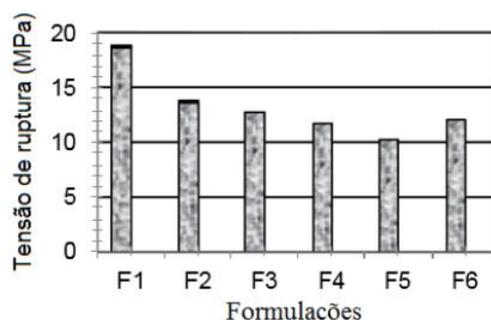


Figura 4.10- Tensão de ruptura a flexão das formulações a 1150°C. FONTE: AQUINO *et al.* (2015).

Analisando os resultados obtidos, é possível verificar que o lodo adicionado na massa de argila na proporção de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em todas as temperaturas de queima, 950°C, 1050°C e 1150°C, alterou as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos corpos de provas produzidos, mas não comprometeu a aplicação do produto cerâmico.

Soares (2016) utilizou argila e lodo de ETE de industrial têxtil, ambos de uma região de Natal-RN. As matérias primas foram caracterizadas por fluorescência de raios X (FRX), difratometria de raios X (DRX), termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (ATD). Posteriormente, o lodo foi incorporado à argila para a fabricação de barras cerâmicas por extrusão, nos percentuais de 0, 10, 20 e 30% em peso úmido. Os corpos de prova foram avaliados por meio dos testes de absorção de água, retração linear de queima e resistência mecânica.

Tabela 4.3- Análise química da argila. FONTE: SOARES (2016).

| Determinação | Argila (%) |
|--------------------------------|------------|
| SiO ₂ | 40,060 |
| Al ₂ O ₃ | 29,670 |
| Fe ₂ O ₃ | 15,590 |
| K ₂ O | 6,550 |
| MgO | 2,800 |
| TiO ₂ | 2,500 |
| CaO | 1,700 |
| SO ₃ | 0,290 |
| ZnO | 0,250 |
| ZrO ₂ | 0,150 |
| CuO | 0,150 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,060 |
| SrO | 0,030 |
| Rb ₂ O | 0,030 |
| Y ₂ O ₃ | 0,020 |
| NiO | 0,010 |

Tabela 4.4- Análise química do lodo. FONTE: SOARES (2016).

| Determinação | Lodo (%) |
|--------------------------------|----------|
| Al ₂ O ₃ | 13,938 |
| SiO ₂ | 5,877 |
| SO ₃ | 2,975 |
| P ₂ O ₅ | 2,578 |
| CaO | 0,723 |
| Cl | 0,615 |
| CuO | 0,186 |
| TiO ₂ | 0,083 |
| ZnO | 0,020 |
| MnO | 0,009 |
| Br | 0,002 |
| P.F. | 72,5 |

A Tabela 4.3 apresenta o resultado de caracterização química da argila, constituída prioritariamente pelos óxidos de silício (40,06%), alumínio (29,67%) e de ferro (15,59%). Já a tabela 4.4 apresenta a análise química obtida para o lodo, em que se observa principalmente a presença do óxido de alumínio (13,94%), de silício (5,88) e de enxofre (2,98%).

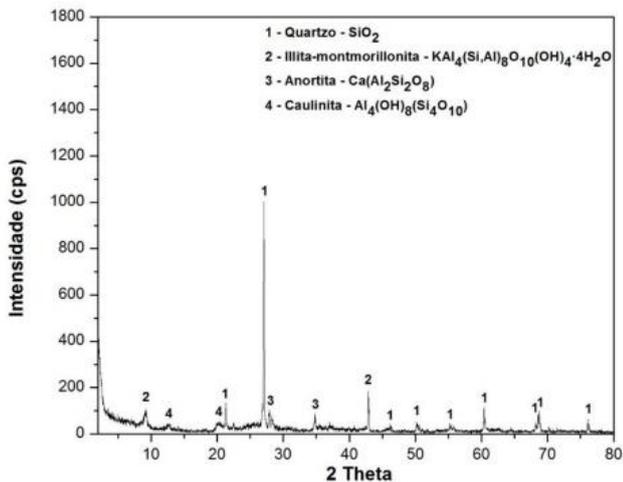


Figura. 4.11- Difratograma da argila. FONTE: SOARES (2016).

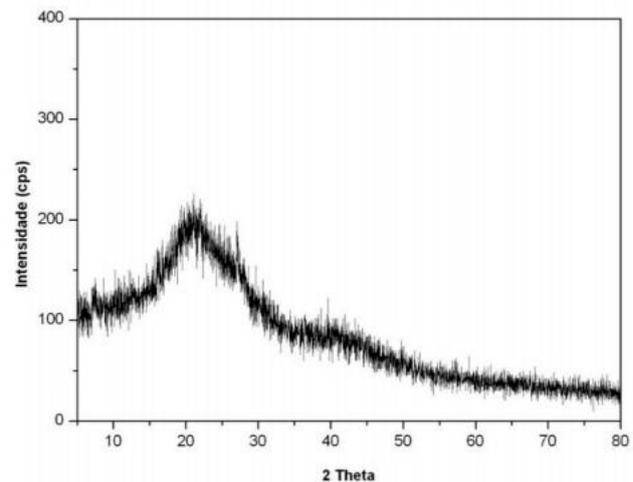


Figura. 4.12- Difratograma do lodo. FONTE: SOARES (2016).

A análise mineralógica da argila, Figura 4.11, revela que os principais minerais detectados foram: illita-montmorillonita, quartzo, anortita e caulinita. As fases do difratograma estão coerentes com a análise química apresentada na Tabela 4.3. Analisando o difratograma do lodo, Figura 4.12, observou-se que ele se apresenta quase que totalmente amorfo. Isto, possivelmente, se deve ao fato da amostra em análise ser composta em grande parte por matéria orgânica.

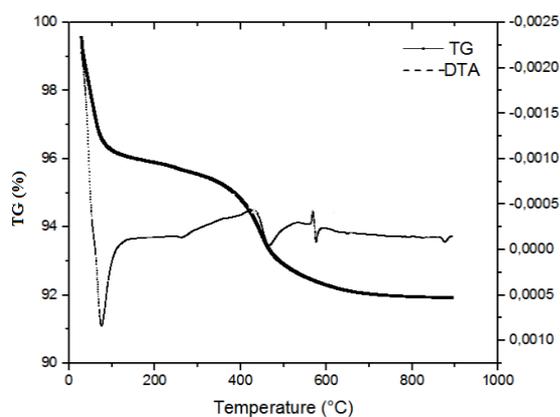


Figura. 4.13- Curvas de TG e DTA da argila. FONTE: SOARES

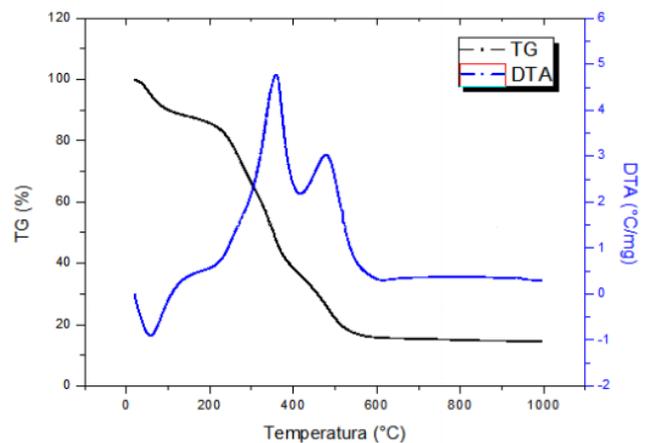


Figura. 4.14- Curvas de TG e DTA do lodo. FONTE: SOARES (2016).

Analisando a Figura 4.13, percebe-se que a curva relativa à TG apresenta três etapas de perda de massa, a primeira perda ocorre no início do aquecimento à aproximadamente 150°C, caracterizando a perda de água livre. A segunda perda acontece entre 200 e 400°C onde há perda de matéria orgânica e a terceira ocorre entre 400 e 600° C onde há a decomposição da hidroxila dos argilominerais. A curva DTA apresenta dois picos endotérmicos e um exotérmico, confirmando os mesmos eventos da análise termogravimétrica.

De acordo com os dados da análise termogravimétrica (TG) e da análise termidiferencial (DTA) do lodo, Figura 4.14, observou-se três eventos de perda de massa, o primeiro entre as temperaturas de 25 e 150°C referente à perda de água superficial das partículas do resíduo. A segunda perda foi entre 150 e 400°C que corresponde a combustão de matéria orgânica, e a terceira foi entre 400 e 600°C que pode ser referente à decomposição dos polímeros provenientes do lodo gerado no processo de tratamento do efluente. A curva DTA apresenta três picos, confirmando os mesmos eventos da análise termogravimétrica.

Para uma melhor classificação do lodo foi realizado os ensaios de Lixiviação e Solubilização.

Tabela 4.5- Resultado do extrato lixiviado. FONTE: SOARES (2016).

| Metais | (mg/L) | Valor Máximo Permitido |
|----------------------|---------------|-------------------------------|
| Arsênio (As) | N.D. | 1,0 mg/L |
| Bário (Ba) | 0,012 | 70,0 mg/L |
| Cádmio (Cd) | N. D. | 0,5 mg/L |
| Chumbo (Pb) | N. D. | 1,0 mg/L |
| Cromo (Cr) | N. D. | 5,0 mg/L |
| Mercúrio (Hg) | N. D. | 5,0 mg/L |
| Prata (Ag) | N.D. | 5,0 mg/L |
| Selênio (Se) | N. D. | 1,0 mg/L |

*ND – Não detectado

Na análise do extrato lixiviado do lodo, Tabela 4.5, praticamente todos os elementos apresentaram concentrações muito baixas ou mesmo nenhuma, não podendo ser detectados pelo equipamento de medição, exceto o elemento químico bário que foi detectado, porém estava abaixo do limite máximo de quantificação permitido pela norma NBR 10004/2004. Dessa forma, podemos classificar o resíduo como não perigoso, Classe II, de acordo com a norma.

Tabela 4.6- Resultado do extrato solubilizado. FONTE: SOARES (2016)

| Metais | (mg/L) | Valor Máximo Permitido |
|----------------------|---------------|-------------------------------|
| Alumínio (Al) | N.D. | 0,2 mg/L |
| Arsênio (As) | N.D. | 0,01 mg/L |
| Bário (Ba) | 0,11 | 0,7 mg/L |
| Cádmio (Cd) | N.D. | 0,005 mg/L |
| Chumbo (Pb) | N.D. | 0,01 mg/L |
| Cobre (Cu) | N.D. | 2,0 mg/L |
| Cromo (Cr) | N.D. | 0,05 mg/L |
| Ferro (Fe) | N.D. | 0,3 mg/L |
| Manganês (Mn) | N.D. | 0,1 mg/L |
| Merúrio (Hg) | N.D. | 0,001 mg/L |
| Prata (Ag) | N.D. | 0,05 mg/L |
| Selênio (Se) | N.D. | 0,01 mg/L |
| Sódio (Na) | 34,81 | 200 mg/L |
| Zinco (Zn) | N.D. | 5,0 mg/L |

*ND – Não detectado

Já para o extrato solubilizado do mesmo lodo, Tabela 4.6, observou-se a presença apenas dos elementos químicos bário e sódio, portanto o resíduo pode ser classificado como inerte, uma vez que a concentração de bário e sódio foram inferior ao valor máximo permitido pela norma NBR 10004/2004.

Dessa forma, o lodo em questão, analisado e classificado como classe II-B, não perigoso, pode, portanto, ser destinado para aterro sanitário ou reutilizado para outros fins industriais.

Os resultados das propriedades técnicas das barras cerâmicas estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Resultados das propriedades técnicas das barras cerâmicas nas diferentes temperaturas e formulações. FONTE: SOARES, (2016).

| Ensaio | Formulações | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | 0 % | 10% | 20% | 30% |
| Queima a 850°C | | | | |
| RLs (%) | 6,20 ± 0,62 | 8,75 ± 0,05 | 9,60 ± 0,48 | 9,95 ± 0,38 |
| RLq (%) | 0,07 ± 0,05 | 0,12 ± 0,11 | 0,25 ± 0,09 | 0,32 ± 0,09 |
| AA (%) | 11,18 ± 0,24 | 14,36 ± 0,33 | 17,43 ± 0,50 | 20,66 ± 1,10 |
| RMF | 4,39 ± 0,24 | 4,23 ± 0,06 | 3,31 ± 0,004 | 1,52 ± 0,02 |
| Queima a 900°C | | | | |
| RLs (%) | 5,36 ± 0,36 | 8,48 ± 0,52 | 9,38 ± 0,18 | 9,47 ± 0,12 |
| RLq (%) | 0,67 ± 0,30 | 0,77 ± 0,41 | 1,05 ± 0,37 | 1,07 ± 0,48 |
| AA (%) | 10,58 ± 0,19 | 13,50 ± 0,44 | 16,33 ± 0,77 | 19,240 ± 0,95 |
| RMF | 4,28 ± 0,05 | 4,36 ± 0,17 | 3,12 ± 0,05 | 1,44 ± 0,01 |
| Queima a 950°C | | | | |
| RLs (%) | 5,60 ± 0,21 | 8,73 ± 0,24 | 9,32 ± 0,19 | 9,44 ± 0,16 |
| RLq (%) | 0,92 ± 0,21 | 1,81 ± 0,17 | 2,62 ± 0,20 | 2,10 ± 0,28 |
| AA (%) | 10,29 ± 0,13 | 11,85 ± 0,95 | 14,24 ± 0,96 | 16,78 ± 0,65 |
| RMF | 3,10 ± 0,04 | 4,21 ± 0,24 | 3,66 ± 0,05 | 1,47 ± 0,02 |

Segundo Dondi (2006), a retração linear de queima ótima, para cerâmicas estruturais (telhas e tijolos), deve ser menor que 1,5% e aceitável entre 1,5 e 3%, para as indústrias os melhores valores de retração linear seriam aqueles bem próximos à zero, onde não alteraria o tamanho do produto.

De acordo com os valores obtidos na Tabela 4.7, é possível verificar que as barras cerâmicas produzidas estão dentro do limite aceitável de retração linear de queima, mas as que apresentam uma retração ótima são todas em que a temperatura de queima foi menor que 900°C. Além disso, pode-se perceber que a incorporação do resíduo têxtil na massa cerâmica aumentou a retração linear sofrida nos corpos de prova.

Ainda, é possível verificar que a incorporação do lodo também causou um aumento na absorção de água, isso, possivelmente, se deve ao fato de que, durante a queima há a evaporação da água presente no lodo e na argila, bem como combustão da matéria orgânica deixando vários poros na estrutura do material. Dentre os corpos de prova fabricados todos estão dentro do limite estabelecido pela NBR 15270/2005, que são no mínimo 8% e no máximo 22% de absorção de água.

Além disso, observa-se que com o aumento da temperatura há uma diminuição na absorção de água em todas as formulações, isso possivelmente se deve ao efeito do fundente em temperaturas elevadas tornando melhor o empacotamento das partículas nas peças cerâmicas.

E por fim, podemos perceber que a resistência mecânica a flexão diminui conforme o lodo é adicionado na massa cerâmica. Segundo Medeiros (2010), este fenômeno ocorre devido à diminuição de fundentes e a presença de maior quantidade de matérias orgânicas, causando liberação de gases que forma poros que por sua vez, fragiliza a amostra e diminui a tensão máxima de ruptura necessária para romper a peça.

Dessa forma, segundo Soares (2016), pode-se concluir que os produtos cerâmicos que terão aplicação na indústria, sem causar danos ao meio ambiente, são aqueles com um limite máximo de 10% de adição do lodo proveniente da indústria têxtil em temperaturas de queima entre 850 e 900°C.

Dias et al. (2014), utilizaram em seu trabalho um lodo proveniente de uma lavanderia industrial da região de Maringá-PR, que foi caracterizado por meio da determinação das seguintes características: teor de umidade e matéria orgânica total, massa específica, pH, concentração de metais e características tóxicas. Já a argila cerâmica foi extraída de uma jazida localizada próximo às margens do rio Ivaí no Município de Paranapoema - PR. Esta argila foi caracterizada quanto aos seguintes parâmetros: teor de umidade e matéria orgânica total, pH, análise granulométrica, limite de plasticidade, limite de liquidez, índice de plasticidade e massa específica. Os resultados obtidos na caracterização do lodo e de argila podem ser visualizados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Caracterização da argila e lodo. FONTE: DIAS *et al.* (2014)

| Parâmetros | Argila | Lodo |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| Aspecto | Seco | Pastoso |
| pH | 4,81 | 6,56 |
| Massa Específica (g/cm ³) | 2,62 | 1,86 |
| Matéria Orgânica Total (%) | 5,33 | 41,70 |
| Umidade (%) | 4,46 | 16,87 |
| Metais | (mg/kg) | (mg/kg) |
| Alumínio | 6.435,00 | 87.520,50 |
| Bário | 2.835,90 | 247,50 |
| Cádmio | 5,40 | 7,20 |
| Chumbo | 61,20 | 90,00 |
| Cobre | 196,20 | 337,50 |
| Cromo | n.d | n.d |
| Ferro | 2.486,70 | 21.231,00 |
| Manganês | 63,00 | 675,00 |
| Mercurio | 0,58 | 0,25 |
| Prata | 0,90 | 63,00 |
| Sódio | 14.845,50 | 14.845,50 |
| Zinco | 40,50 | 163,80 |

n.d: não detectado.

Observando a Tabela 4.8, é possível observar que a argila e o lodo apresentam mesma quantidade de sódio. Provavelmente esse dado está equivocado, uma vez que, normalmente, as argilas não contêm grandes quantidades de sódio em suas composições.

O lodo em questão, como pode ser observado, apresentou quantidades significativas de umidade e matéria orgânica, características que influenciam na qualidade final do bloco cerâmico, pois praticamente toda esta água e matéria orgânica presente, acaba sendo volatilizada no processo de queima dos blocos.

Além disso, esse lodo apresentou quantidades elevadas de alumínio, ferro e sódio. O alumínio e ferro são provavelmente provenientes dos floculantes, tais como, sulfato de alumínio e cloreto férrico, utilizados durante o processo de tratamento do efluente industrial. Já o sódio é característico dos processos de tingimento de artigos têxteis, onde é utilizado na forma de cloreto de sódio.

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do lodo têxtil, os quais visaram analisar o impacto ambiental provocado pela exposição do resíduo ao ambiente. Fragmentos destes resíduos quando expostos à lavagem por água da chuva, poderiam provocar a contaminação do

lençol freático, por meio do processo de infiltração dos metais tóxicos desprendidos do resíduo.

Tabela 4.9- Ensaio de lixiviação e solubilização do lodo. FONTE: DIAS *et al.* (2014)

| Metais | Concentração Teste Solubilização (mg/L) | Limite Máximo (mg/L) NBR 10004(2004) (| Concentração Teste Lixiviação (mg/L) | Limite Máximo (mg/L) NBR 10004(2004) |
|----------|---|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Alumínio | 0,220 | 0,200 | - | - |
| Bário | 3,299 | 0,700 | 4,929 | 70,0 |
| Cádmio | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,5 |
| Chumbo | n.d | 0,010 | 0,030 | 1,0 |
| Cobre | 0,020 | 2,000 | - | - |
| Cromo | n.d | 0,050 | nd | 5,0 |
| Ferro | 1,444 | 0,300 | - | - |
| Fluoreto | - | - | 0,600 | 150,0 |
| Manganês | 5,444 | 0,100 | - | - |
| Prata | n.d | 0,050 | 0,003 | 5,0 |
| Sódio | 101,128 | 200,0 | - | - |
| Zinco | 0,012 | 5,000 | - | - |

Por meio do extrato lixiviado do lodo têxtil, verificou-se que as concentrações dos metais relacionados na norma NBR 10004/2004 (ABNT) estão abaixo dos valores de referência. Dessa forma, segundo Dias *et al.* (2014), o lodo têxtil pode ser classificado como um resíduo de classe II, ou não perigoso.

Enquanto que para o extrato solubilizado do lodo têxtil, observou-se que as concentrações de alumínio, bário, ferro, manganês, apresentaram valores de concentração acima dos limites estabelecidos pela referida norma, o que leva a classificar o lodo como um resíduo classe II-A, ou seja, não inerte.

Com a argila e lodo coletados foram feitos blocos cerâmicos. Os blocos cerâmicos foram fabricados, por meio de uma extrusora, com o lodo incorporado a argila, com os seguintes percentuais de lodo de lavanderia: 0 (referência), 5 e 10% em peso. A queima dos blocos ocorreu em forno industrial de uma cerâmica localizada na cidade de Floresta - PR, a 850°C. Algumas propriedades cerâmicas dos blocos foram avaliadas, como resistência à compressão, absorção de água, lixiviação e solubilização.

Para os blocos cerâmicos produzidos, o ensaio da absorção de água foi realizado em um período de 24 horas à temperatura ambiente.

Os autores constataram que, o aumento do teor de lodo aumenta a absorção de água, o que ocasionou maior retração dos blocos cerâmicos com a queima e reduziu os valores da resistência à compressão.

Pela análise das figuras 4.15 e 4.16 pode-se observar os resultados obtidos para absorção de água e resistência a compressão nos blocos cerâmicos.

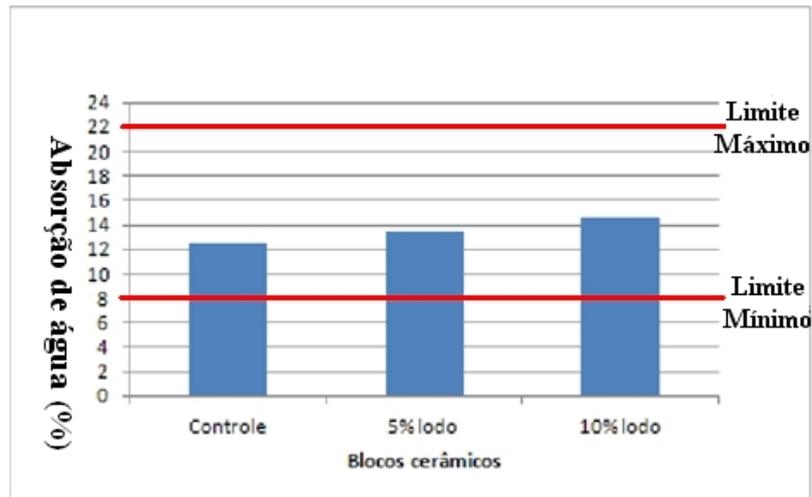


Figura 4.15 - Absorção de água nos blocos cerâmicos em escala reduzida FONTE: DIAS *et al.* (2014).

Com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água percebe-se que apesar do aumento, os índices de absorção de água não ultrapassaram os limites recomendados pela norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005).

Segundo Dias *et al.* (2014), o aumento da absorção de água acontece, pois com o aumento do teor de lodo, devido ao processo de queima do bloco cerâmico, onde a matéria orgânica se volatiliza, poros são formados. Esses poros, quando o bloco fica sujeito a ação de líquidos, são preenchidos, retendo a água.

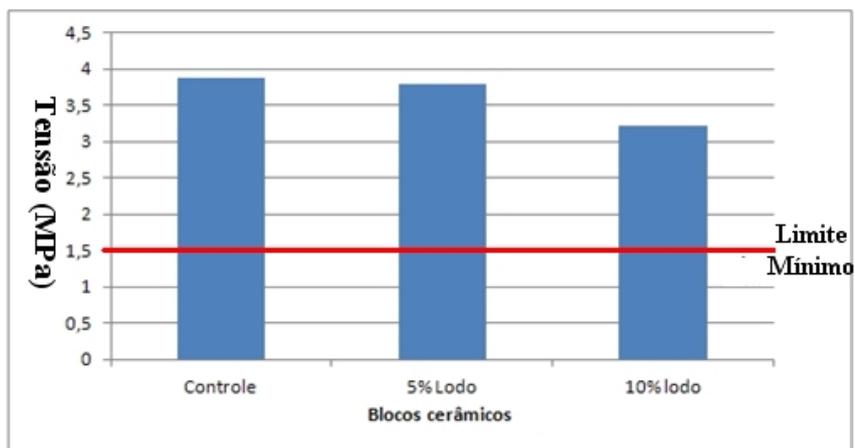


Figura 4.16 - Resistência característica à compressão nos blocos cerâmicos em escala reduzida. FONTE: DIAS *et al.* (2014).

A resistência mecânica dos blocos cerâmicos produzidos, para os teores estipulados de incorporação de lodo, atendeu ao limites mínimo especificados pela norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005).

Como pode ser observado com o aumento da incorporação de lodo houve uma redução dos valores da resistência à compressão. Segundo Dias *et al.* (2014) este comportamento pode ser 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 presente no lodo. Quanto maior a quantidade de lodo incorporado na massa do bloco cerâmico, menor será sua resistência mecânica.

Também foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização nos blocos cerâmicos produzidos e os resultados são apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10- Concentração de metais do extrato lixiviado dos blocos cerâmicos (NBR 10005(2004)). FONTE: DIAS *et al.* (2014).

| Metais | Bloco Controle | 5% lodo | 10% lodo | Lim. Máx. (mg/L) |
|--------|----------------|---------|----------|------------------|
| Bário | n.d | n.d | n.d | 70 |
| Cádmio | n.d | n.d | n.d | 0,5 |
| Chumbo | n.d | n.d | n.d | 1 |
| Cromo | 0,002 | 0,0027 | 0,0031 | 5 |
| Prata | n.d | n.d | n.d | 5 |

n.d: valor não detectado pelo aparelho.

Tabela 4.11 - Concentração de metais do extrato solubilizado dos blocos cerâmicos (NBR 10006/2004). FONTE: DIAS *et al.* (2014).

| Metais | Bloco Controle | 5% lodo | 10% lodo | Lim. Máx. (mg/L) |
|----------|----------------|---------|----------|------------------|
| Alumínio | n.d | n.d | n.d | 0,200 |
| Bário | n.d | n.d | n.d | 0,700 |
| Cádmio | 0,004 | n.d | n.d | 0,005 |
| Chumbo | n.d | n.d | n.d | 0,010 |
| Cobre | n.d | n.d | n.d | 2,000 |
| Cromo | n.d | n.d | n.d | 0,050 |
| Manganês | 0,023 | 0,021 | 0,020 | 0,100 |
| Prata | 0,005 | 0,035 | 0,040 | 0,050 |
| Sódio | 2,941 | 2,863 | 2,837 | 200,000 |
| Zinco | 0,304 | 0,247 | 0,244 | 5,000 |

n.d: valor não detectado pelo aparelho.

Os resultados obtidos mostram que as concentrações dos metais nos extratos lixiviados e solubilizados, dos blocos cerâmicos produzidos com as proporções de lodo, foram abaixo dos limites definidos pelas NBR 10004/2004 da ABNT. Assim, os resíduos dos blocos cerâmicos poderão ser classificados como não perigosos e inertes ou classe II – B.

Portanto, segundo Dias e colaboradores, conclui-se que o bloco cerâmico com a incorporação de 10% lodo na matriz de argila em escala reduzida não comprometeu a qualidade técnica do material, permanecendo dentro dos limites permitidos pelas as normas vigentes.

Mymrin *et al.* (2016), incorporaram o lodo de lavanderia em uma mistura de argila e areia na quantidade de 0, 3, 5, 7, 10, 15 e 20% em peso. Depois de preparada as formulações, os corpos de prova foram confeccionados e sinterizados em diferentes temperaturas, 1000, 1050, 1100 e 1150°C. Os resultados obtidos das propriedades técnicas dos corpos de prova foram: os valores de resistência mecânica a flexão variaram de 2,3 a 15,6 MPa, os valores de retração linear de queima variaram de 4,5 a 14,1%, os valores de absorção de água de 13,0 a 20,3% e valores de densidade variaram de 1,65 a 1,83 g/cm³. Todas estas propriedades mecânicas dos corpos de prova confeccionados, apresentaram valores superiores as propriedades da mistura de argila e areia pura, ou seja, sem a incorporação do lodo.

Além disso, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de lixiviação e solubilização, que permitiram verificar que a massa cerâmica imobilizou os metais pesados presentes no lodo, uma vez que, os valores dos metais pesados obtidos foram centenas de vezes menores do que os estabelecidos em norma.

Dessa forma, Mymrin e seus colaboradores (2016), concluíram que o lodo de lavanderia industrial pode ser utilizado com segurança como uma aditivo na indústria cerâmica em proporções de 10 e 20% em peso, uma vez que melhora as propriedades mecânica dos materiais e constitui uma forma ecológica de gestão deste resíduo.

Castro *et al.* (2015), estudaram a caracterização de blocos cerâmicos acústicos produzidos com incorporação de lodo de lavanderia têxtil. Características físicas (absorção de água), mecânicas (resistência à compressão), de toxicidade e de superfície (microscopia eletrônica de varredura) foram avaliadas em blocos cerâmicos acústicos, fabricados por meio do processo de solidificação/estabilização

(S/E), a partir da incorporação de lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes têxteis. Os blocos cerâmicos acústicos foram produzidos com incorporação de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35% de lodo têxtil na massa de argila, bem como o bloco controle por extrusão. A queima dos blocos ocorreu em temperatura média de 930°C. Os resultados mostraram que com o aumento da incorporação de lodo, ocorreu redução dos valores de resistência à compressão média dos blocos e um aumento nos índices de absorção de água. Com relação à resistência característica à compressão, os blocos cerâmicos acústicos fabricados em todas as formulações apresentaram valores acima do mínimo exigido pela norma, que é de 3,0 MPa. Conforme os resultados do ensaio de absorção de água dos blocos, a produção de blocos até a incorporação máxima de 25%, com exceção do bloco com incorporação de 5% de lodo, apresentou-se dentro dos limites estabelecidos nas normas vigentes. Os resultados indicaram a porcentagem de 20% de lodo como o limite para fornecer material com características de acordo com os padrões estabelecidos pela legislação brasileira. O processo de S/E foi eficiente no aproveitamento/tratamento do lodo têxtil, uma vez que permitiu a imobilização dos poluentes na massa de argila, os quais não foram lixiviados, nem solubilizados.

Ramos *et al.*(2009), avaliaram a utilização do lodo têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação. A incorporação do resíduo têxtil em matrizes de argila para a produção de blocos cerâmicos de vedação foi avaliada por meio do processo de solidificação/estabilização (s/e). Inicialmente foi feita a caracterização do resíduo têxtil e da argila, utilizada como matriz para produção de blocos cerâmicos de vedação. A composição química deste resíduo têxtil é variada, contendo Al, Fe, Mn, Na, Pb, Cu, Cr e Zn, oriundos do processo têxtil e do tratamento do efluente gerado no processo. Posteriormente, foram preparados blocos com composição 0, 5, 10, 15, 20 e 25% de resíduo têxtil. A mistura foi feita proporcionalmente em porcentagem de massa seca. Para análise comparativa das características químicas desses blocos cerâmicos, foram produzidos blocos somente com argila. Os blocos foram confeccionados por extrusão e após a secagem foram queimados em fornos de olaria a 850°C durante 72 h. Após a produção dos blocos, realizaram-se ensaios de acordo com as normas técnicas, tais como absorção de água e compressão axial simples. Os resultados mostram que: as concentrações dos metais analisados, nos extratos lixiviados e solubilizados dos blocos cerâmicos, em todas as proporções de incorporação do resíduo têxtil, ficaram abaixo dos limites

definidos pela NBR 10004/2004 da ABNT, classificando-os como não perigosos e inertes, ou seja, não oferecendo riscos de futura contaminação do solo durante a sua vida útil, bem como quando o mesmo for disposto em aterros depois de utilizados. A resistência mecânica dos blocos cerâmicos de todas as proporções de incorporação atenderam ao requisito mínimo exigido por norma. Além disso, foi possível observar que, com até 20% de resíduo têxtil incorporado à massa cerâmica, os requisitos exigidos por norma ABNT relacionados ao índice de absorção de água foram obedecidos. Assim, o processo de s/e foi capaz de imobilizar de forma eficaz os metais presentes no resíduo têxtil nos blocos cerâmicos.

Herek *et al.* (2012), realizaram a caracterização de tijolos cerâmicos incorporados com lodo de lavanderia têxtil. Os tijolos cerâmicos destinados à construção civil foram fabricados misturando o lodo têxtil e argila da região de Maringá, nas seguintes proporções: 0 (controle), 5, 10, 15 e 20% em massa. O lodo e argila utilizadas foram previamente caracterizados em termos de composição, microestrutura e comportamento térmico. Os tijolos foram fabricados por extrusão em escala laboratorial e real. Após a secagem eles foram queimados a 900°C em forno industrial. Os tijolos sinterizados foram avaliadas em termos de suas características mecânicas por meio do ensaio de flexão em três pontos, além de questões ambientais verificadas através de testes de lixiviação e solubilização. Os resultados obtidos mostraram que o lodo pode ser incorporado até uma concentração de 20% (em massa) produzindo tijolos adequados em termos de suas propriedades mecânicas. Além disso, o tijolo produzido é seguro e inerte de acordo com os testes de lixiviação e solubilização realizados.

Os trabalhos apresentados, nesta seção, indicaram, de forma geral, que a utilização de lodo de lavanderia em massa para produção de cerâmica vermelha, quando em quantidades apropriadas, geralmente 10% de lodo em peso, não prejudica o produto final. Seus resultados mostraram que a adição do lodo promove um aumento sensível na absorção de água e retração linear, bem como uma redução na resistência mecânica. No entanto, esses valores variam de acordo com as características da massa argilosa e da temperatura de queima utilizada.

CAPÍTULO 5

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais que foram utilizados e a metodologia que foi empregada para caracterização das matérias primas, confecção dos corpos de prova, determinação de aspectos microestruturais, bem como as propriedades das cerâmicas que foram produzidas. Isso pode ser observado de forma esquemática no fluxograma da Figura 5.1.

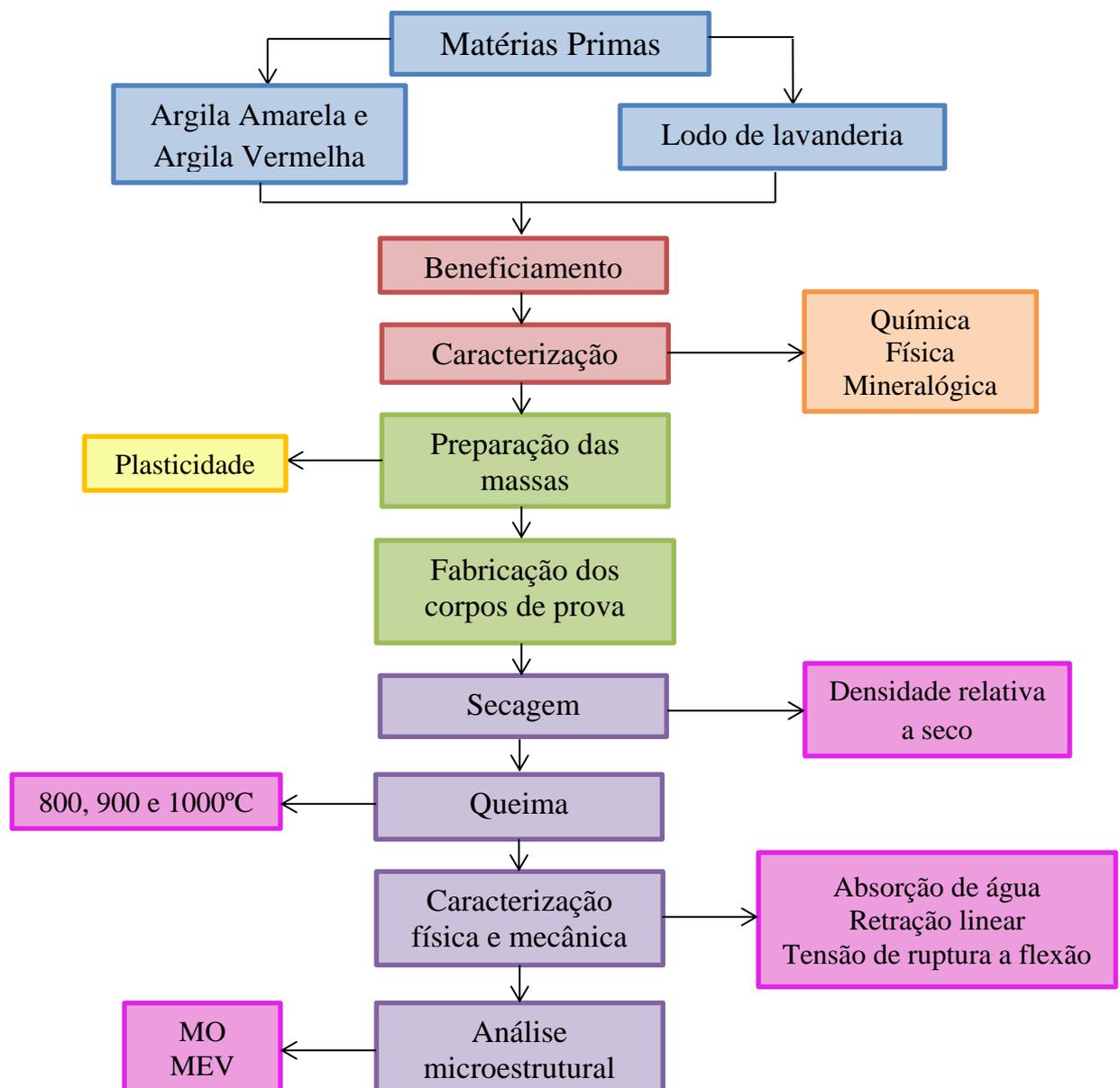


Figura 5.1- Fluxograma esquemático do procedimento experimental.

5.1. Materiais

No presente trabalho foram utilizadas como matérias-primas a argila amarela de Campos dos Goytacazes-RJ (Figura 5.2), a argila vermelha de Itaboraí-RJ (Figura 5.3), cedidas pela Cerâmica Rodolfo de Azevedo Gama e o lodo de ETE de lavanderia industrial (Figura 5.4), proveniente do processo de beneficiamento e tinturaria de artigos de vestuário da Lavanderia Cinco Estrelas, localizado na cidade de São João de Nepomuceno-MG. As matérias-primas foram coletadas e encaminhadas ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF para as devidas análises e procedimentos experimentais.



Figura 5.2- Argila amarela

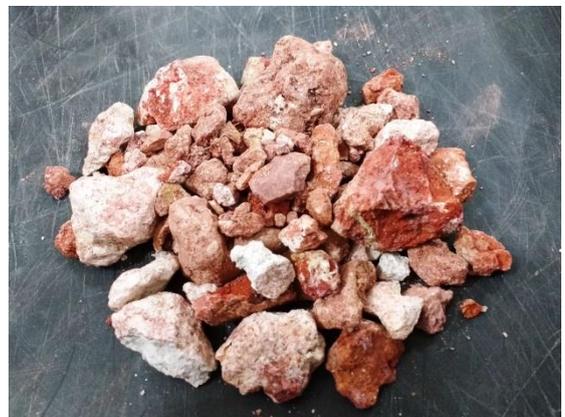


Figura 5.3- Argila vermelha.



Figura 5.4- Lodo de ETE seco.

Visando o atendimento da norma de despejo em aterros, a Lavanderia Cinco Estrelas em parceria com a empresa Engequisa classificou o resíduo proveniente da ETE. Para isso foram realizados a amostragem do resíduo, pré-testes específicos e

ensaios de lixiviação e solubilização. Com isso o resíduo lodo de ETE foi classificado como Classe II A-Não inerte, podendo assim ser disposto em aterros industriais.

5.2. Métodos

5.2.1. Beneficiamento das matérias primas

Após coleta, as argilas foram secas em estufa de laboratório da marca OLIDEF CZ modelo Linea (Figura 5.5) a 110°C até peso constante, para retirada da água residual. Posteriormente, foram desagregadas utilizando-se o triturador de mandíbula e moinho de bolas, para diminuir o tamanho das partículas das matérias-primas. Em seguida, o material já moído, sofreu a desagregação das partículas, manualmente, através do almofariz e pistilo de porcelana até passagem completa em peneira de 20 mesh (abertura de 0,84 mm).

Já o lodo, após a coleta, foi seco na mesma estufa a 60°C, para evitar a volatilização de matéria orgânica, até peso constante para retirada da água residual, e posteriormente foi desagregado manualmente através do almofariz e pistilo de porcelana e peneirado da mesma forma que a argila.



Figura 5.5- Estufa utilizada na secagem dos materiais.

5.2.2. Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram submetidas a ensaios de caracterização mineralógica, química e física por meio de técnicas de difração de raio-X, fluorescência de raio-X, sedimentação por peneiramento e gravimetria.

5.2.2.1. Caracterização Química

5.2.2.1.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

As matérias primas, para a realização deste ensaio, foram peneiradas em peneira de 200 mesh (abertura de 0,074mm).

A composição química das matérias primas foi determinada utilizando um espectrômetro de fluorescência de raio-X, de energia dispersiva (ED-XRF), da marca UNICAM, modelo SOLAR 969, acoplado a um computador para o processamento de dados. Esta análise foi realizada no Instituto SENAI- Unidade de Criciúma/SC- Centro de Tecnologia em Materiais – LDCM. Os resultados foram obtidos na forma de percentuais de óxidos.

A perda ao fogo foi determinada através da obtenção do peso da amostra antes e depois da mesma ser levada a 950°C por meia hora.

5.2.2.2 - Caracterização mineralógica

5.2.2.2.1 - Difração de raios X

Nesta análise foram utilizadas amostras das argilas e do lodo de ETE em forma de pó, que também foram peneirados em peneira de 200 mesh, para identificar os minerais presentes no material. A análise foi realizada através da técnica de difração de raios X (DRX) pelo LAMAV/UENF, em um difratômetro de modelo SHIMADZU XRD 7000, nas seguintes condições de operação: radiação Cu K α (35 kV/40 mA) e 2 θ variando de 5 a 100° passo de 0,02° e tempo de 5s por passo.

As substâncias presentes foram identificadas por comparação entre as intensidades e as posições dos picos de Bragg com os arquivos do padrão JCPDS (Joint Committee on Diffraction Standards), com auxílio do Software Rigaku no LCFIS – CCT/UENF.

5.2.2.3. Caracterização Física

5.2.2.3.1. Peneiramento e sedimentação por gravimetria

A distribuição de tamanho de partícula das matérias-primas foi obtida usando método combinado de peneiramento e sedimentação por gravimetria, de acordo com

a norma técnica da ABNT NBR-7181 (ABNT, 1984a), no Laboratório de Engenharia Civil, LECIV/UENF.

O procedimento de peneiramento consiste basicamente na classificação do tamanho de partículas que ficam retidas no peneiramento grosso até 20 mesh, e por um peneiramento fino que é constituído por peneiras de 20, 40, 60, 100 até 200 mesh.

Para a realização do ensaio de sedimentação o material foi passado na peneira de 200 mesh. A técnica de sedimentação foi efetuada com dispersão de 70 g da amostra em 125 mL de água com adição de 5,71 g de hexametáfosfato de sódio tamponada com 1 g de carbonato de sódio com a finalidade de desagregar as partículas. A suspensão foi agitada durante 15 minutos e colocada em tubos de teste. O diâmetro esférico equivalente das partículas da amostra foi calculado através da lei de Stokes, na qual a velocidade de sedimentação depende do tamanho da partícula e da viscosidade do fluido.

$$V = gd^2 \frac{\rho - \rho_f}{18\eta} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde V = velocidade terminal, g = gravidade, d = diâmetro esférico equivalente, ρ = massa esférica do material ρ_f = massa esférica do fluido, η = viscosidade do meio fluido.

Este ensaio tem como objetivo estimar os percentuais correspondentes a cada fração granulométrica da argila e do resíduo. Por meio da granulometria das argilas é possível prever a sua utilização para a fabricação de diversos produtos de cerâmica vermelha através do Diagrama de Winker (WINKLER, 1954 *apud* MORAIS, 2013).

5.2.3. Análises Térmicas (TG/DTG, TG/DSC e Dilatométrica)

Para obter as curvas das análises térmicas diferencial, termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial foi utilizado um analisador da marca NETZSCH modelo STA 449F3 do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da Escola de Engenharia de Lorena-USP. As amostras, de 2g do resíduo peneirado a 200 mesh, foram aquecidas ao ar em cadinhos de alumina, com faixa de temperatura entre 30 a 1200°C e taxa de aquecimento de 10°C/min, com o intuito de

identificar as mudanças nas propriedades físicas e ou químicas do material particulado em função da temperatura.

A dilatometria das formulações com 0 e 10% de resíduo foi realizada em corpos de prova, aproximadamente, com 10 mm de diâmetro e 17 mm de comprimento, resultante da prensagem de 3 gramas da amostra umedecidas com 5% de água, com pressão de 1274,0 kgf/cm². O equipamento utilizado foi o Dilatômetro modelo DIL 402 PC, marca *Netzsch*, da Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) - Centro de Ciências Tecnológicas - Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV. O ensaio foi conduzido com taxas de aquecimento de 5°C/min, de 30 a 1050 °C.

Foi realizada a análise dilatométrica com o propósito de complementar a identificação das fases mineralógicas das matérias-primas, bem como avaliar o seu comportamento de queima (retração e expansão).

5.2.4. Preparação das formulações

Nesta etapa foi feita a preparação primeiramente da massa argilosa, que é constituída de 75% de argila amarela e de 25% de argila vermelha de Itaboraí e posteriormente foram preparadas as formulações com incorporação do lodo de ETE na massa argilosa nas seguintes concentrações: 0; 2,5; 5 e 10% em massa.

A massa argilosa e o lodo de ETE após o beneficiamento foram pesados de acordo com as formulações previamente calculadas e misturados.

As formulações foram homogeneizadas a seco em um moinho de bolas durante 20 minutos e posteriormente as composições foram armazenadas em sacos plásticos por 24 horas.

A Tabela 5.1 mostra a composição das formulações.

Tabela 5.1 – Composição das formulações preparadas.

| Formulações (F) | Composição | |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | Massa argilosa (% em massa) | Lodo de ETE (% em massa) |
| F0 | 100,0 | 0,0 |
| F1 | 97,5 | 2,5 |
| F2 | 95,0 | 5,0 |
| F3 | 90,0 | 10,0 |

5.2.4.1. Plasticidade

O conhecimento da plasticidade de uma massa cerâmica é muito importante, visto que auxilia na etapa de conformação de um produto cerâmico, permitindo se avaliar a adequação da matéria prima utilizada com relação à moldagem das peças.

A plasticidade das massas cerâmicas pelo método de Atterberg foi obtida de acordo com as normas da ABNT NBR-7180 (ABNT, 1984a) e ABNT NBR-6459 (ABNT, 1984b). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado por:

$$IP = LL - LP \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde o limite de plasticidade (LP) é o teor de água, expresso em % do peso de pasta seca a 110°C, acima do qual a massa argilosa pode ser moldada em cilindros, com cerca de 3 a 4mm de diâmetro e 15cm de comprimento. O limite de liquidez (LL) é o teor de água expresso em % do peso de pasta seca a 110°C, acima do qual a pasta flui como líquido quando ligeiramente agitada. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV/UENF).

5.2.5. Processamento dos corpos de prova

As formulações preparadas foram umedecidas com aproximadamente 30% de água, de modo a obter uma massa pastosa com plasticidade adequada para ser conformada por extrusão. Foram confeccionados, pelo menos, 39 corpos de prova para cada formulação em extrusora conhecida também como “maromba” (Figura. 5.6).



Figura 5.6- Extrusora utilizada na confecção dos corpos de prova.

Após a extrusão, os corpos de prova foram secos em estufa a 50°C por 48 horas, para evitar o empenamento e o surgimento de trincas no material, e depois foram secos por mais 24 horas a 100°C. Os corpos de prova secos foram queimados em forno laboratorial da marca INTI, modelo FL- 1300 (Figura 5.7), com taxa de aquecimento de 2°C/min com temperatura de patamar de 800, 900 e 1000°C. Os corpos de prova foram mantidos na temperatura de patamar por 3 horas e resfriados por convecção natural, desligando-se o forno.

Antes do processo de queima foi determinada a densidade relativa a seco das peças, e após foram determinadas absorção de água, retração linear, densidade aparente e resistência mecânica.



Figura 5.7- Forno utilizado na queima dos corpos de prova.

5.2.6. Ensaios físicos e mecânicos dos corpos de prova

5.2.6.1. Densidade relativa

Primeiramente foi determinada a densidade aparente dos corpos de prova pelo método dimensional, utilizando a norma ASTM C373-72 (1977a). Foram realizadas medições do comprimento dos corpos de prova com auxílio de um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução +/- 0,01mm) e as massas foram determinadas através de uma balança digital Shimadzu modelo S3000 (precisão de 0,01g).

A densidade aparente foi calculada utilizando-se a seguinte expressão:

$$\rho_{Ap} = \frac{M}{V} \quad (\text{Eq. 3})$$

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

Posteriormente foi determinada a densidade real das matérias-primas por picnometria de acordo com a norma NBR 6508 (ABNT, 1984b) no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV/UENF).

A densidade relativa foi calculada dividindo a densidade aparente pela densidade real.

5.2.6.2. Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM C373-72 (1977a). Os corpos de prova foram pesados e em seguida colocados em um recipiente com água fervente por 2 horas, depois foram resfriados submersos em água. Posteriormente, foi retirada a água superficial de cada peça, e os corpos de prova foram pesados novamente. A absorção de água (AA) foi calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$AA(\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

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

5.2.6.3. Retração linear de queima

A retração linear das peças queimadas (R_{Lq}) foi determinada com o auxílio de um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução 0,01mm), de acordo com a norma MB-305 (ABNT), por meio da seguinte expressão:

$$R_{Lq}(\%) = \frac{(L_s - L_q)}{L_s} 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde L_s representa o comprimento do corpo de prova após secagem e L_q após a queima.

5.2.6.4. Tensão de Ruptura à Flexão

A tensão de ruptura à flexão em três pontos (σ) dos corpos de prova foi determinada em conformidade com a norma ASTM C674-77 (1977b), em máquina de ensaios universal, da marca Instron, modelo 5582 (LAMAV/UENF). A velocidade de aplicação da carga pelo cutelo foi de 0,5 mm/min. A distância entre os cutelos de apoio (L) de 90mm. A tensão foi calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde σ 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).

5.2.7. Análise microestrutural

A avaliação e caracterização microestrutural das cerâmicas queimadas foram realizadas por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

5.2.7.1. Microscopia ótica (MO)

Alguns corpos de prova cerâmicos com 0 e 10% de resíduo queimados a 800 e 1000°C foram tomados aleatoriamente e cortados com disco diamantado, suas superfícies foram lixadas com lixa 1200. Após o preparo da superfície, as amostras, com cerca de 5mm de espessura, foram secas a temperatura ambiente.

A fim de avaliar a superfície das amostras preparadas, foram realizadas análises por MO, utilizando-se Microscópio Confocal Olympus, modelo LEXT4000 do LAMAV/UENF.

5.2.7.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Amostras do resíduo na forma de pó foram depositadas sobre uma fita de carbono em uma superfície lisa e depois passaram pelo processo de metalização. Após esse processo, as micrografias foram obtidas no equipamento TM3000

HITACHI do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da Escola de Engenharia de Lorena-USP.

A superfície das cerâmicas queimadas também foi analisada por MEV. As amostras foram preparadas de forma similar à análise de MO. Após o preparo da superfície, as amostras foram secas e metalizadas em metalizador SHIMADZU, modelo IC-50. Feito isso, a análise foi realizada no MEV SHIMADZU, modelo 55X-550, no LAMAV/UENF, com o objetivo de analisar a textura da superfície dos corpos de prova.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização das matérias primas

6.1.1. Argilas

6.1.1.1. Composição química

Na tabela 6.1 estão representadas as composições químicas das argilas amarela e vermelha utilizadas na formulação da massa cerâmica. Observa-se que as argilas apresentam composição química semelhante, com elevado teor de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), que estão em sua maior parte combinados formando os aluminossilicatos como a mica muscovita e a caulinita, por exemplo. Além de conterem baixo teor de óxidos fundentes (K_2O e Na_2O), apresentando assim composição química tipicamente caulinítica. (VIEIRA; PINHEIRO, 2011).

A argila amarela e vermelha apresentam uma relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 2,26 e 1,99 respectivamente. Esta razão é um indicativo da quantidade de argilomineral e quartzo presentes nas argilas da região. Quanto mais próxima for esta relação de 1,18, que corresponde à caulinita teórica, maior será a quantidade de caulinita presente na argila. Desta forma, a argila vermelha possui maior quantidade de caulinita e menor teor de SiO_2 livre, na forma de quartzo, em comparação com a argila amarela. (VIEIRA; PINHEIRO, 2011, BABISK, 2015).

Os compostos alcalinos (K_2O e Na_2O) e alcalinos terrosos (CaO e MgO), devido à formação de fase líquida durante a sinterização entre 950 e 1000°C, promovem um aumento na densificação do corpo de prova e conseqüentemente uma maior retração linear, aumentando assim a resistência mecânica do material. (CARGNIN et al., 2011 *apud* GUIMARÃES, 2017).

Além disso, o teor de óxidos corantes presentes é elevado, principalmente o Fe_2O_3 , que confere uma coloração avermelhada ao produto após a queima.

É observada uma considerável perda ao fogo (PF) nas duas argilas, a argila amarela com 8,60% e a vermelha com 9,63%, que está associada a uma perda de material devido ao aumento de temperatura. Segundo Vieira e Pinheiro (2011), esta perda ao fogo (PF) ocorre principalmente devido à eliminação de água de constituição da caulinita, bem como, da desidratação de hidróxidos e oxidação de

matéria orgânica presentes nas argilas. Uma perda ao fogo excessiva acarreta retração e porosidade durante a queima.

Tabela 6.1- Composição química das argilas (% em peso)

| Componente | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | MnO | K ₂ O | Na ₂ O | CaO | MgO | P ₂ O ₅ | PF* |
|-----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|------------------|-------------------|-------|------|-------------------------------|------|
| Argila Amarela | 53,58 | 23,76 | 9,00 | 1,14 | <0,05 | 1,92 | 0,5 | 0,33 | 0,99 | 0,14 | 8,60 |
| Argila Vermelha | 52,72 | 26,53 | 8,64 | 1,20 | <0,05 | 0,81 | <0,05 | <0,05 | 0,28 | 0,12 | 9,63 |

*PF- Perda ao fogo

6.1.1.2. Difração de raios X (DRX)

A Figura 6.1. apresenta o difratograma de raios-X da massa cerâmica, 75% de argila amarela e 25% de argila vermelha, utilizada neste trabalho. Podem ser observados picos de difração correspondentes a caulinita (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O), quartzo (SiO₂), gibbsita (Al(OH)₃), mica muscovita (KAl₂Si₃AlO₁₀(OH,F)₂), goethita (FeO(OH)) e feldspato potássico (K₂O.Al₂O₃.6SiO₂). . A detecção de goethita indica que a argila é de queima vermelha e que parte do ferro presente está na forma de hidróxido. (GUIMARÃES, 2017).

A caulinita está presente em muitas argilas utilizadas para fabricação de produtos de cerâmica vermelha, sendo responsável pelo desenvolvimento de plasticidade da massa e da resistência mecânica das peças conformadas. (VIEIRA; MONTEIRO, 2004). Além disso, esse argilomineral se transforma em metacaulinita quando aquecida em temperaturas entre 450 a 650 °C, e a metacaulinita dá origem à mulita em temperaturas ainda mais elevadas. Estas transformações são acompanhadas de mudanças na densificação e nas propriedades físico-mecânicas das peças (GONZÁLEZ; CARRERAS; RUIZ, 2007 *apud* AMARAL, 2016). As argilas de Campos dos Goytacazes são predominantemente caulíníticas e apresentam comportamento refratário de queima.

O quartzo ou sílica livre é um mineral encontrado naturalmente nas argilas e solos, constituindo a principal impureza presente nas argilas. Atua como matéria-prima não plástica e inerte durante a queima, podendo causar prejuízos na peça cerâmica, como: diminuir a plasticidade do material e alguns efeitos nocivos, como o surgimento de trincas, devido à variação volumétrica que ocorre durante as suas mudanças de fase cristalina. (SANTOS, 1989).

A presença de gibbsita indica que nem toda a alumina está na estrutura dos argilominerais. A gibbsita contribui para o aumento de refratariedade das argilas e

da perda de massa durante a queima, assim sendo, aumenta a perda ao fogo e o custo energético, prejudicando o produto final. Já a mica muscovita é um mineral com morfologia lamelar que pode ocasionar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas. Porém, caso apresente tamanho de partícula reduzido, a mica muscovita pode atuar como fundente devido à presença de óxidos alcalinos (VIEIRA *et al.*, 2006).

A presença de goethita provoca uma alteração na cor da cerâmica, quando em concentrações em torno de 1% a argila fica com uma tonalidade amarelada, com a intensificação de sua concentração, e devido à oxidação da mesma em hematita, as argilas vão ficando mais avermelhadas (DIAS, 2011).

Nas argilas utilizadas neste trabalho foram identificados picos de difração de baixa intensidade que indicam traços de feldspato na massa cerâmica. O feldspato é um mineral considerado fundente para a indústria cerâmica, o que favorece a formação de fase líquida durante a etapa de queima, auxiliam na diminuição da porosidade (MONTEIRO e VIEIRA, 2003).

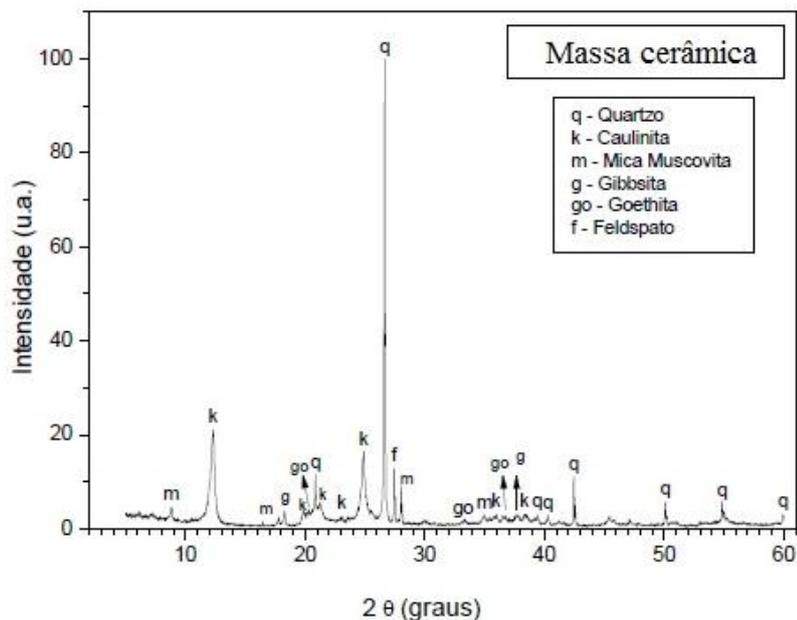


Figura 6.1- Difratograma de raios X da massa cerâmica.

6.1.1.3. Granulometria

A Figura 6.2 apresenta a distribuição de tamanho de partículas das argilas e da massa cerâmica utilizadas neste trabalho.

De acordo com a *International Society of Soil Science*, as diferentes faixas de diâmetro dos grãos foram classificadas em: fração argila, que corresponde às partículas com diâmetro esférico equivalente $< 2 \mu\text{m}$, a fração silte, que corresponde à faixa entre $2 - 20 \mu\text{m}$ e a fração areia, que corresponde às partículas $> 20 \mu\text{m}$ (SANTOS, 1989).

A argila amarela apresenta teores de “fração argila”, “fração silte” e “fração areia” de 33, 31,05 e 35,95%, respectivamente. Já para a argila vermelha estes teores são de 54,7, 23,33 e 21,97% e para a massa cerâmica 38,42, 29,12 e 32,46%, respectivamente.

Nota-se que a argila vermelha apresenta fração argila superior à argila amarela, o que indica sua maior plasticidade, uma vez que os argilominerais, responsáveis pelo aporte de plasticidade estão associados a este intervalo, conferindo à massa argilosa consistência plástica que possibilita conformar as peças por extrusão (BABISK, 2015).

A massa cerâmica apresenta uma elevada fração areia, que está associada às partículas de quartzo. Essa elevada fração areia pode ser problemática 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 (VIEIRA; PINHEIRO, 2011).

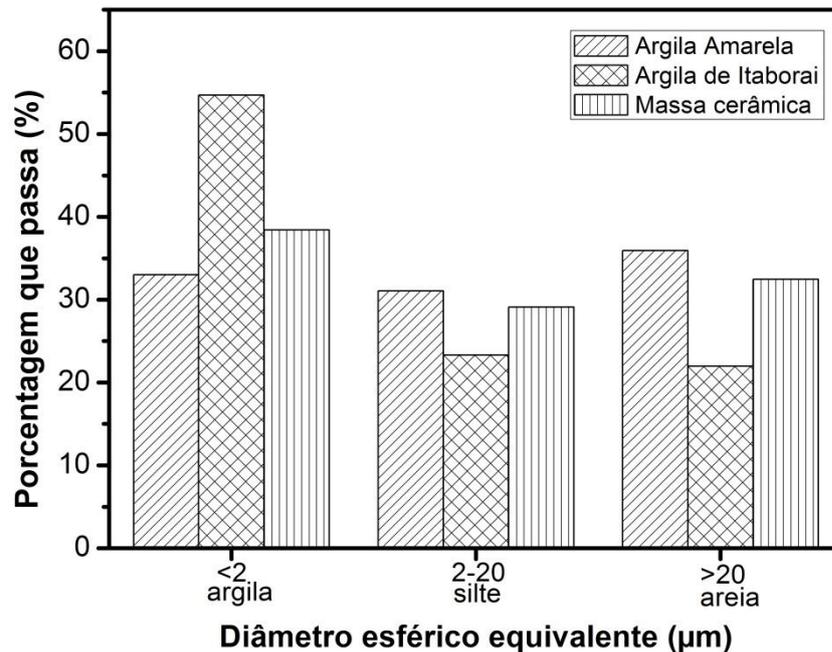


Figura 6.2 - Distribuição do tamanho de partículas da massa cerâmica.

6.1.2. Lodo de ETE de lavanderia industrial

6.1.2.1. Composição química

A Tabela 6.2 apresenta a composição química do lodo. Observa-se que o lodo de ETE, apresenta elevados valores de sílica (29,52%), alumina (26,56%) e de CaO (6,11%).

O elevado teor de sílica, possivelmente está associado às pedras de argila expandida usadas durante o processo de stonagem, com o intuito de preparar o tecido para receber os corantes e alvejantes.

A grande quantidade de alumínio e ferro, possivelmente é proveniente dos floculantes, como sulfato de alumínio e cloreto férrico, que são utilizados durante o processo de tratamento do efluente industrial (CASTRO, 2010).

O sódio e cálcio, muito provavelmente, são provenientes do agente antifúngico e do eletrólito utilizado no tingimento, durante o processo de produção têxtil (KAMINATA, 2008). Os demais elementos encontrados, possivelmente são constituintes de produtos utilizados durante o processo de tratamento da água ou do lodo, e ficam retidos no material.

A elevada perda ao fogo (PF) desse resíduo ocorre principalmente devido à desidratação de hidróxidos e oxidação de matéria orgânica.

Tabela 6.2 - Composição química do lodo (% em peso)

| Componente | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | MnO | K ₂ O | Na ₂ O | CaO | MgO | P ₂ O ₅ | PF* |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------------------|-------------------|------|------|-------------------------------|-------|
| Lodo de ETE | 29,52 | 26,62 | 2,45 | 0,16 | 0,79 | 0,97 | 0,93 | 6,11 | 0,78 | 1,97 | 29,60 |

*PF- Perda ao fogo

6.1.2.2. Difração de raios X (DRX)

A Figura 6.3 apresenta o difratograma de raios X do lodo de ETE utilizado como resíduo neste trabalho. Esse difratograma apresentou um halo amorfo entre aproximadamente 15 e 33° para 2θ com alto valor de PF (29,60), o que indica a possibilidade da existência no lodo de compostos orgânicos que se volatizam liberando principalmente CO, CO₂ e CH₄. Além disso, nesse difratograma é possível observar a presença de calcita (CaCO₃), heterosita (FePO₄), nordstrandita (Al(OH)₃) e quartzo (SiO₂).

A calcita é encontrada em tintas, vernizes, pigmentos e revestimentos, e contribui com o aumento da resistência a abrasão, bem como auxilia no controle do pH. (MINERAÇÃO JUQUIÁ, 2015).

A nordstrandita é um polimorfo do hidróxido de alumínio, utilizado na obtenção de sulfato de alumínio, que é usado durante o tratamento do efluente como floculante.

Já a heterosita é utilizada na fabricação de tintas e pigmentos, e deve estar presente em pequena quantidade, visto que pode causar danos aos seres humanos, como: irritação nos olhos, pele e vias respiratórias.

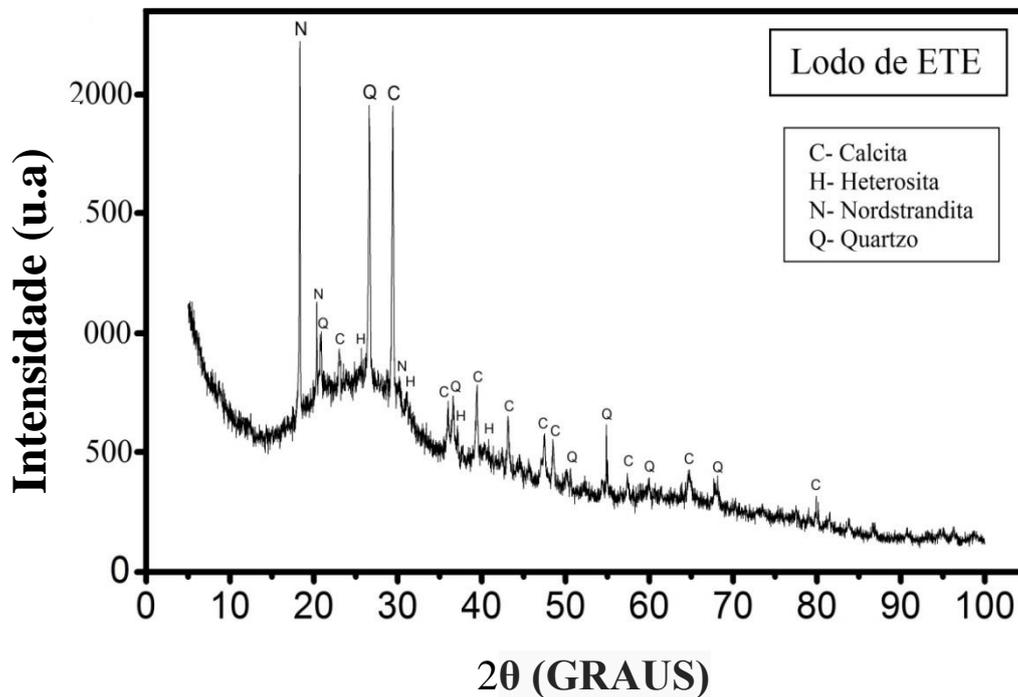


Figura 6.3 - Difratoograma de raios X do Lodo de ETE de lavanderia industrial.

6.1.2.3. Análise térmica

6.1.2.3.1. Termogravimetria (TG)

A curva de TG, curva preta da Figura 6.4, mostra a variação de peso, em porcentagem, da amostra de 34,1mg de lodo com o aumento da temperatura. Percebe-se que logo no início do aquecimento ocorreu uma redução de 12% até aproximadamente 220°C, que pode estar associada à perda de água de umidade do resíduo. Após essa temperatura ocorre redução de 19%, até 640°C, devido, possivelmente a combustão e volatilização da matéria orgânica presente no resíduo, obtendo a 1100°C uma redução da massa total em 33 %, que é muito próxima ao valor correspondente a perda ao fogo de 29,6% obtida na análise química.

A curva DTG auxilia a visualização de início e fim dos eventos ocorridos.

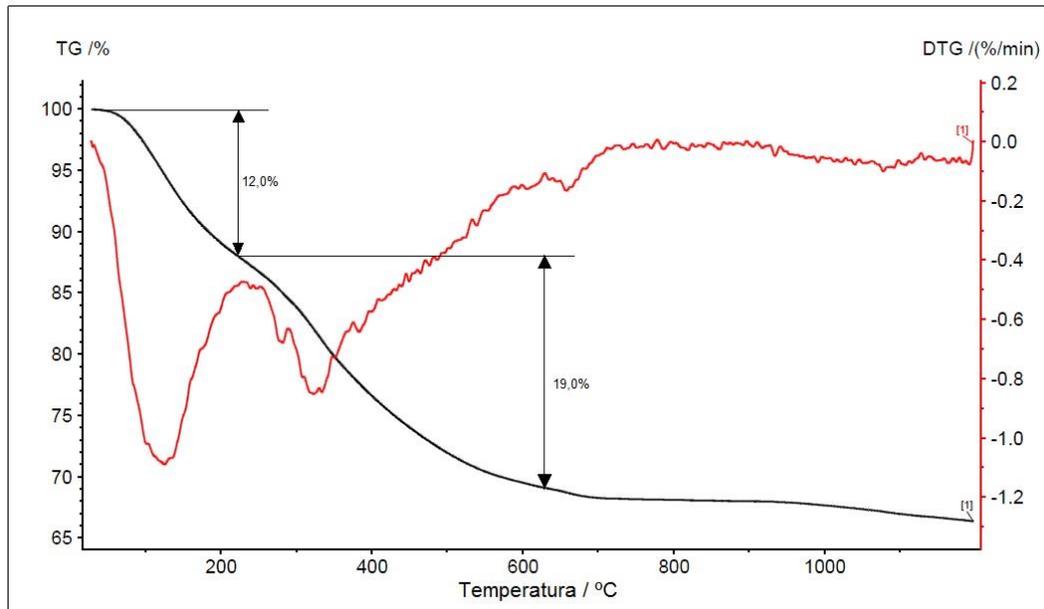


Figura 6.4 - Curvas de TG/DTG do lodo de lavanderia.

6.1.2.3.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Figura 6.5 apresenta a caracterização térmica por calorimetria exploratória diferencial (DSC/TG), realizada principalmente para verificar a transição térmica e o comportamento de degradação do resíduo.

Na curva de calorimetria exploratória diferencial (DSC), curva azul da Figura 6.5, nota-se, em aproximadamente 120°C, um pico endotérmico referente ao processo de desidratação do material, na mesma região de perda de água obtida pela curva TG. Em 335,3°C e 388,2°C observa-se picos exotérmicos, que podem estar associados à oxidação da matéria orgânica contida no lodo. Isso indica que o lodo de ETE libera calor nessa faixa de temperatura, este calor liberado pode contribuir para a economia de combustível durante a etapa de pré-queima da cerâmica. Dessa forma, o lodo de ETE de lavanderia industrial, pode ser considerado um resíduo combustível, segundo a classificação de Dondi *et al.* (1997b).

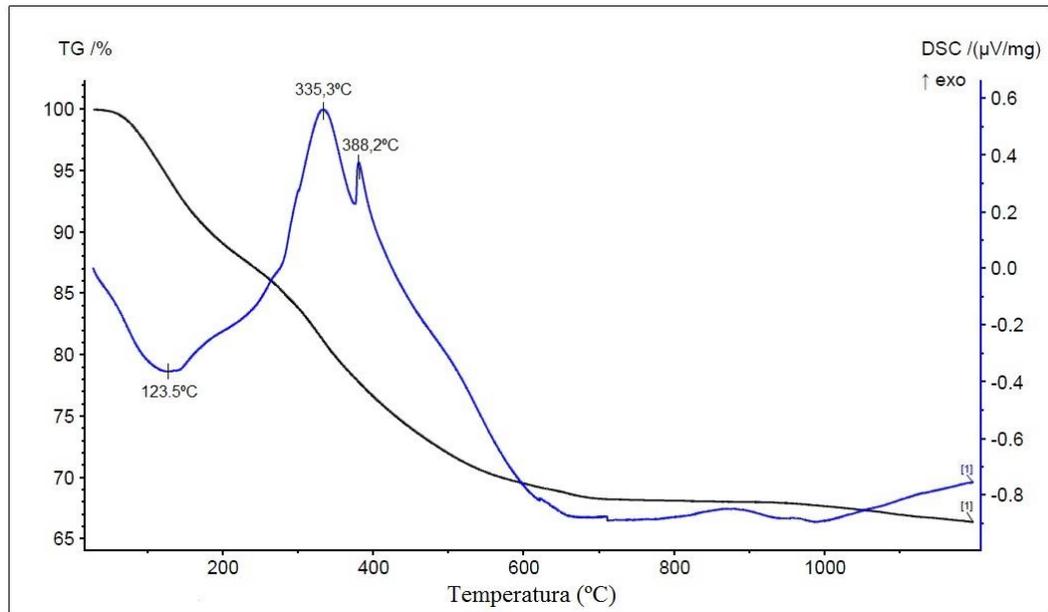
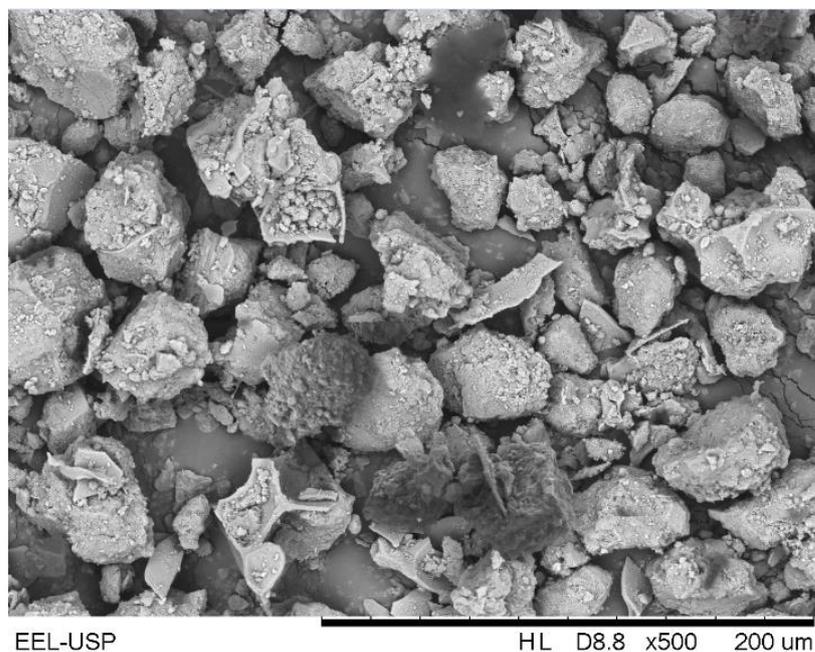


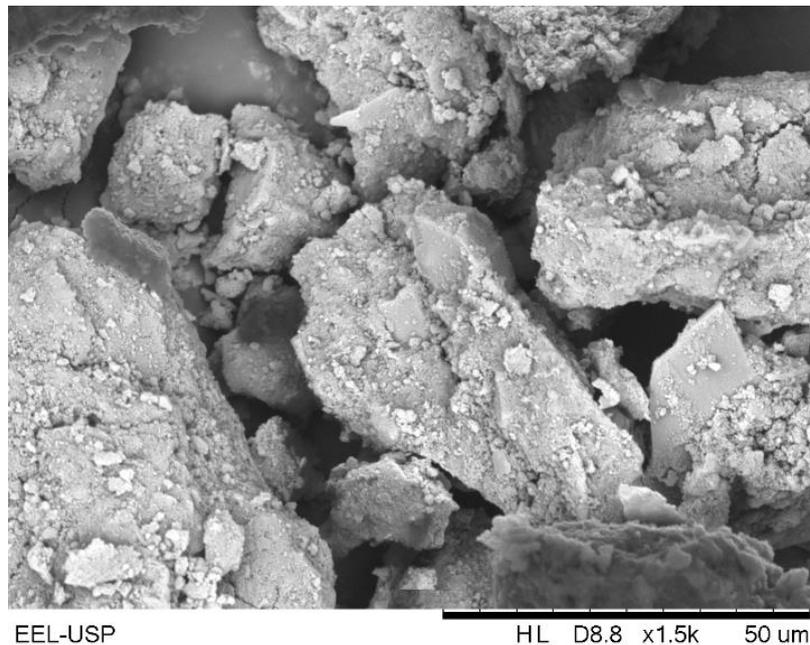
Figura 6.5 - Curvas de TG/DSC do lodo de lavanderia industrial.

6.1.2.4. Microscopia eletrônica de varredura do lodo em pó

A Figura 6.6 mostra micrografias de MEV, em dois aumentos, do lodo de lavanderia em pó. Nas micrografias é possível observar partículas com variados tamanhos e de diferentes formas, ou seja, o resíduo apresenta morfologia e granulometria heterogênea. Além disso, percebe-se a presença de aglomerados, agregados e plaquetas.



a)



b)

Figura 6.6 - Micrografias (MEV) do lodo de lavanderia em pó, em diferentes aumentos. (a) 500x e (b) 1500x.

6.1.2.5. Granulometria

A Figura 6.7 mostra a distribuição do tamanho de partículas do lodo de ETE de lavanderia industrial.

Pela análise da Figura 6.7 nota-se que cerca de 80% das partículas do resíduo apresentam entre 0,1 e 1,1 mm. Essa fração granulométrica está concentrada na “fração areia” (>20 μ m) o que segundo Melchiades et al. (1997) *apud* Faria (2015), pode reduzir algumas propriedades das peças cerâmicas como resistência à flexão a seco ou após a queima.

Além disso, a granulometria relativamente grosseira do lodo pode causar a redução da viscosidade e conseqüentemente prejudicar a molhabilidade e consolidação das partículas durante a etapa de queima da cerâmica (MORAIS, 2013).

O resíduo apresentou comportamento de um material não-plástico com “fração areia” de 82,7%, e “fração silte” de 17,3%.

É importante ressaltar que os teores de materiais plásticos e não-plásticos estão relacionados com a trabalhabilidade/plasticidade da massa cerâmica, o que pode influenciar nos fatores tecnológicos como conformação, retração de secagem, resistência mecânica e ainda no comportamento de queima das peças.

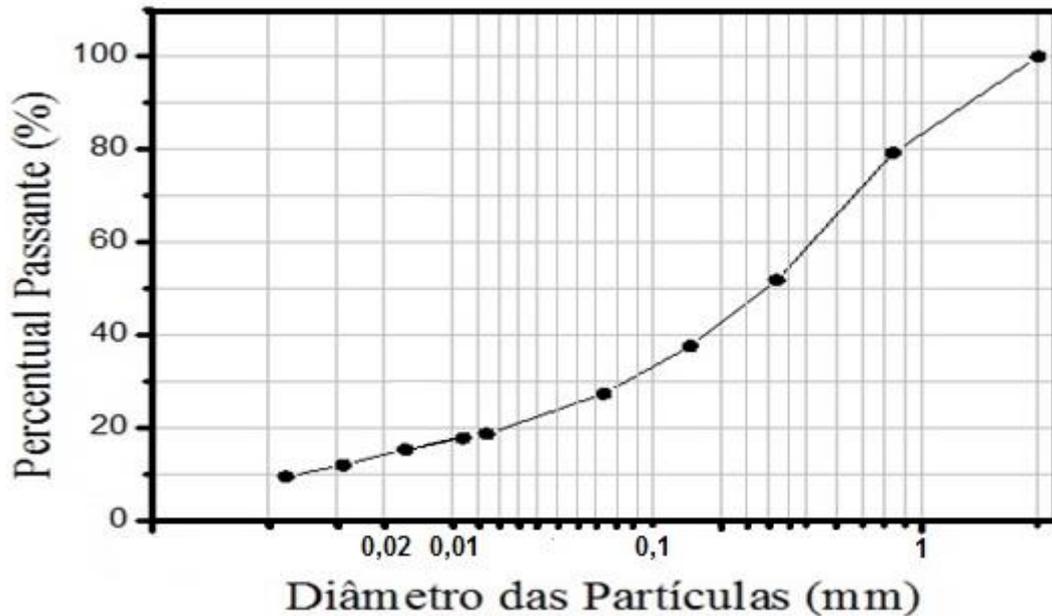


Figura 6.7 - Distribuição do tamanho de partículas do lodo de ETE de lavanderia industrial.

A Figura 6.8 apresenta o Diagrama de Winkler. Este diagrama baseia-se na granulometria das argilas para delimitar regiões apropriadas à fabricação de determinados produtos de cerâmica vermelha, tais como produtos de difícil produção, **região A**, telhas, **região B**, blocos vazados, **região C** e tijolo maciço, **região D**.

Para facilitar a utilização do diagrama de Winkler, as distribuições granulométricas da massa cerâmica e do lodo, bem como das formulações com 2,5; 5 e 10% de lodo incorporado à massa cerâmica, estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Distribuição das faixas granulométricas das amostras

| Amostras | Composição Granulométrica (%) | | |
|----------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | Fração Argila (<2 μ m) | Fração Silte (2 a 20 μ m) | Fração Areia (>20 μ m) |
| Massa cerâmica | 38,4% | 29,1% | 32,5% |
| Lodo | - | 17,3% | 82,7%, |
| 2,5%Lodo | 37,4% | 28,8% | 33,8% |
| 5%Lodo | 36,5% | 28,5% | 35% |
| 10%Lodo | 34,6% | 27,9% | 37,5% |

De acordo com o Diagrama de Winkler (Figura 6.8), a massa cerâmica utilizada neste estudo está localizada na região apropriada para a fabricação de telhas (região B). Já o resíduo, apresenta uma granulometria bem mais grosseira que a massa cerâmica, localizando-se na parte inferior do diagrama, próximo ao vértice $>20 \mu\text{m}$. Entretanto, essa característica do lodo de ETE de lavanderia industrial não altera a localização da massa cerâmica, pois mesmo com 2,5; 5 e 10% de incorporação, as formulações permanecem dentro da região B.

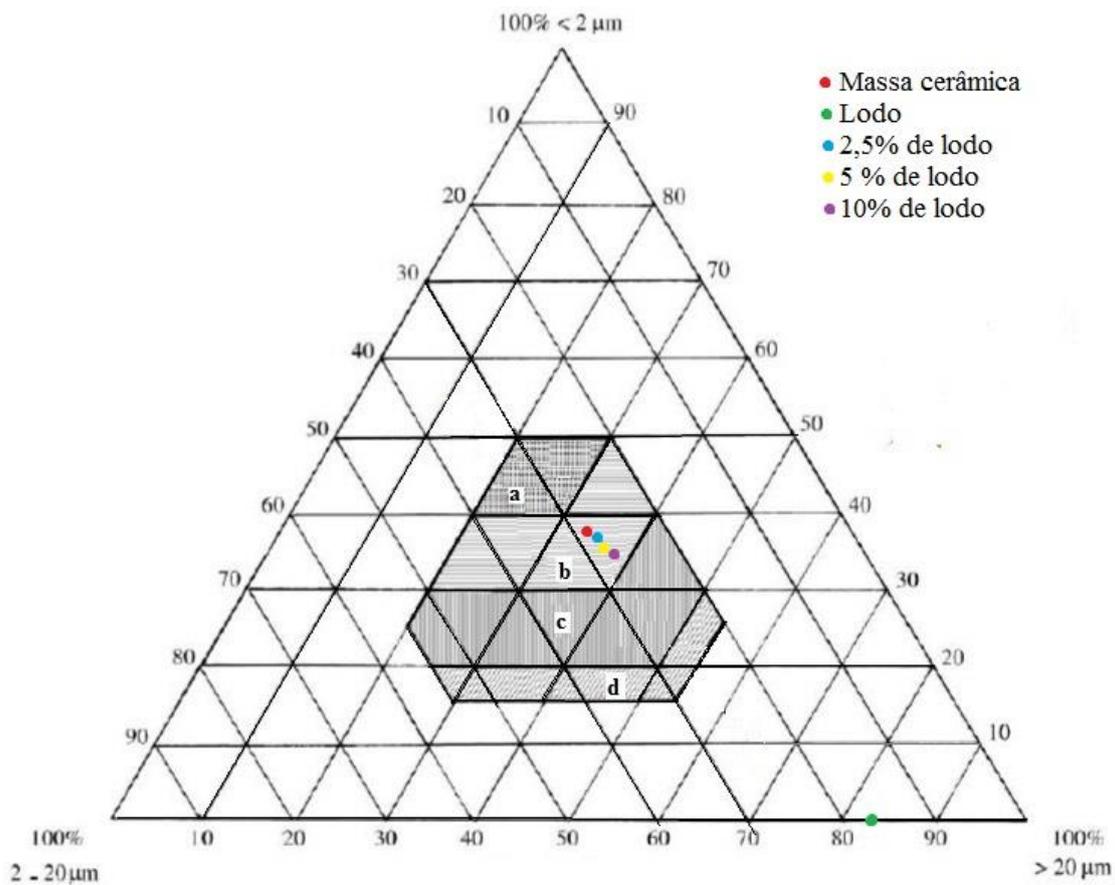


Figura 6.8 - Diagrama de Winkler com a localização da massa cerâmica, do lodo e das formulações.

6.2. Caracterização das composições

6.2.1. Plasticidade

A determinação da plasticidade é de grande importância para cerâmica vermelha, já que indica sua adequação para ser conformada por extrusão. Um dos métodos mais utilizados na sua determinação é o de Atterberg, por meio dele

determinam-se o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) dos solos.

O limite de plasticidade (LP) indica a quantidade de água mínima necessária para que a argila ou a massa cerâmica alcance a consistência necessária para sua conformação no estado plástico. O limite de liquidez (LL) está associado à máxima quantidade de água que a argila ou massa cerâmica possam conter para ainda ser moldáveis e não adquirir consistência de lama. Já o índice de plasticidade (IP) é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, ou seja, representa a quantidade de água que ainda pode ser adicionada a partir do limite de plasticidade, sem alterar o estado plástico da argila ou massa cerâmica (VIEIRA, 2003; RIBEIRO, 2010).

Na Tabela 6.4 estão os limites de Atterberg das formulações preparadas neste trabalho.

Tabela 6.4 - Limites de Atterberg das formulações

| Limites de Atterberg | Formulações (% de resíduo em massa) | | | |
|----------------------|-------------------------------------|------|------|------|
| | F0 | F2,5 | F5 | F10 |
| LP(%) | 33,0 | 31,5 | 30,2 | 29,6 |
| LL(%) | 59,5 | 58,4 | 57,4 | 56,0 |
| IP(%) | 26,5 | 26,9 | 27,2 | 26,4 |

A Figura 6.9 apresenta a localização das composições, num gráfico elaborado a partir dos limites de Atterberg que indica regiões de extrusão ótima e aceitável, possibilitando assim, obter um prognóstico da etapa de conformação por extrusão das formulações.

Ao observar a Figura 6.9 é possível verificar que a faixa aceitável do limite de plasticidade (LP) é de 18 a 30%, e que as formulações com 0, 2,5 e 5% de lodo incorporado possuem valores de LP acima do recomendado, isto indica a necessidade de utilização de uma maior quantidade de água para extrudar as peças. Conseqüentemente, a etapa de secagem pode ser mais problemática com aumento do risco de defeitos e tempo mais prolongado, o que aumenta o gasto energético e reduz a produtividade (VIEIRA *et al*, 2003). Este comportamento ocorre provavelmente em função da excessiva plasticidade da massa cerâmica estudada. Este resultado é corroborado pelas análises química, física e mineralógica.

Apenas a formulação com 10% de lodo encontra-se dentro desta faixa. Isso ocorre, uma vez que, a adição do lodo como um material não-plástico acarretou diminuição do LP apresentando assim melhor trabalhabilidade. Apesar disso, foi possível confeccionar corpos de prova por extrusão para todas as formulações.

Em todas as formulações, os índices de plasticidade encontram-se com valores superiores aos 10%, que é o valor mínimo aceitável, isso porque IP inferiores a 10% caracterizam materiais com dificuldade de conformação por extrusão, pois quanto menor o valor de IP, menor será a capacidade da massa cerâmica em suportar variações na umidade de conformação sem que atinja o estado de lama, ou fique abaixo da consistência plástica (ABAJO, 2000 *apud* AMARAL, 2016).

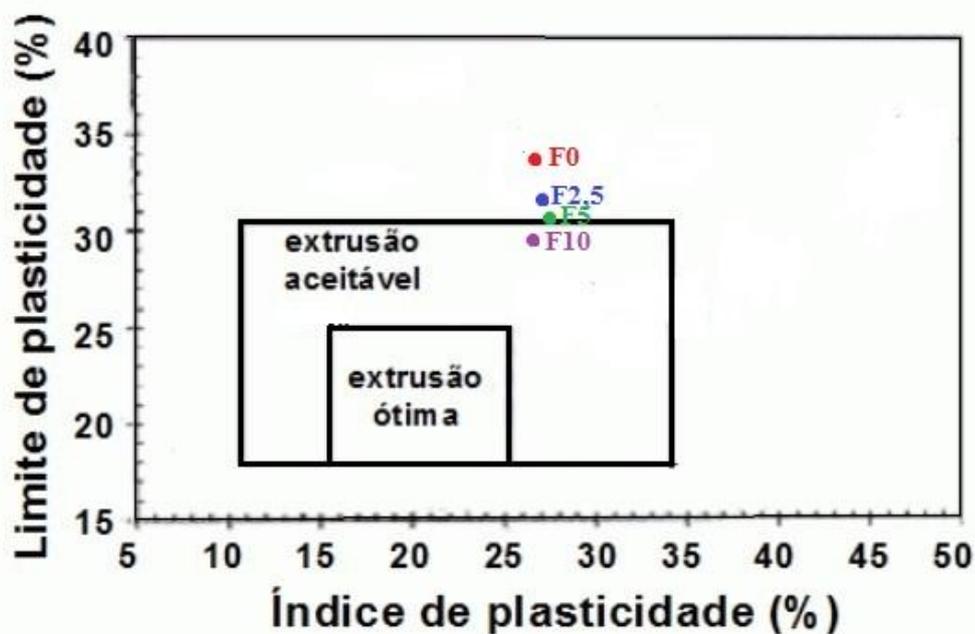


Figura 6.9 - Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg.

6.2.2. Dilatometria

A Figura 6.10 apresenta as curvas dilatométricas da formulação F0, com 0% de resíduo, e F10, com 10% de lodo. Nessas curvas, as transformações físicas e químicas que ocorrem nas massas cerâmicas, podem ser interpretadas a partir de transformações térmicas de variações dimensionais (contração e expansão) das amostras (GUIMARÃES, 2017).

Como pode ser observado, as curvas apresentaram comportamentos dilatométricos semelhantes, com ligeiras acentuações dos fenômenos para a

formulação com 10% de lodo incorporado. As diferenças observadas estão fundamentalmente relacionadas às diferentes quantidades de material argiloso e não argiloso presentes nas amostras.

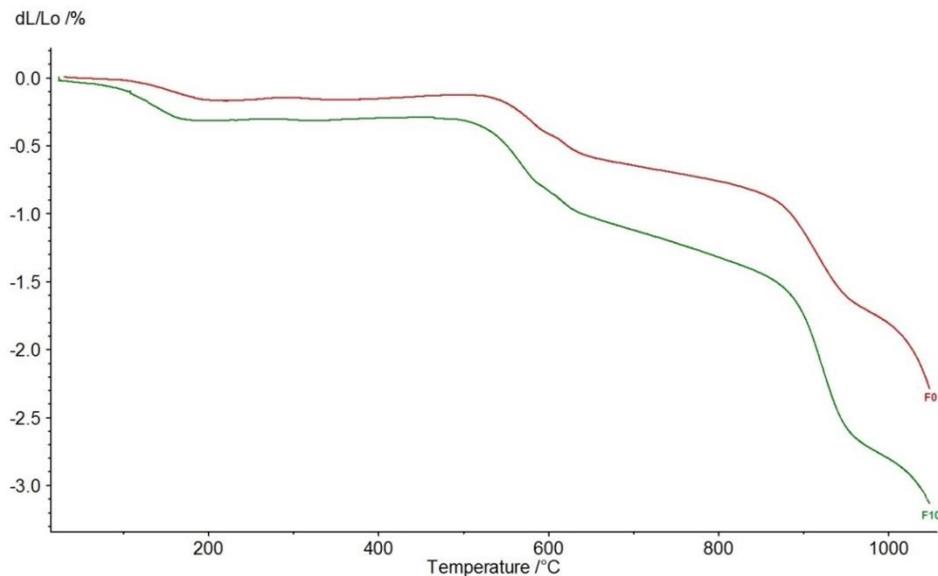


Figura 6.10 - Dilatometria das formulações F0 e F10.

Analisando as curvas dilatométricas, percebe-se que de 100°C até 220°C, as amostras experimentam uma contração. Este evento pode ser atribuído à eliminação da água adsorvida. Em seguida, as amostras se estabilizam até 500°C, aproximadamente.

A partir de 500°C, as amostras experimentam uma intensa contração, promovida pela transformação da caulinita na fase amorfa metacaulinita (ABAJO, 2000).

Entre as temperaturas de 570 e 600 °C ocorre uma mudança de inclinação na curva de contração, em que a taxa de contração diminui, isso é causado pela transformação alotrópica do quartzo. Quanto maior o teor de quartzo na massa, maior é o efeito pronunciado.

A partir de 900°C a taxa de contração torna a aumentar, esse aumento pode estar associado à formação de fase líquida envolvendo eutéticos entre SiO₂ e os óxidos alcalinos fundente (ROEDER, 1959 *apud* GUIMARÃES, 2017). Este evento é o principal mecanismo responsável pela sinterização e consolidação das partículas em cerâmicas argilosas, causando redução da porosidade e conseqüentemente aumento da resistência mecânica (AMARAL, 2016).

6.2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas

6.2.3.1. Densidade relativa a seco

As matérias-primas apresentam diferentes densidades reais, dessa forma, o grau de empacotamento a seco das cerâmicas foi avaliado por meio da densidade relativa. A Figura 6.11 mostra os valores de densidade relativa a seco obtidos para os corpos de prova confeccionados. Esta densidade foi determinada pela divisão da densidade aparente pela densidade real da cerâmica.

Segundo Babisk (2015), a densidade depende da distribuição granulométrica e da forma dos grãos, portanto, da composição mineralógica da matéria-prima. Dessa forma, quanto mais denso for o corpo de prova, melhor "empacotado" está, pois mais próximos ficam seus grãos e tendencialmente, menos espaços vazios possuem. Na produção de cerâmica isso é benéfico uma vez que o aumento da área de contato entre as partículas favorece a sinterização.

A densidade real dos grãos do resíduo e de massa cerâmica são $2,14\text{g/cm}^3$ e $2,76\text{g/cm}^3$, respectivamente. Assim, observando a Figura 6.11, nota-se que a adição do resíduo nos percentuais indicados, promove uma redução da densidade relativa a seco, indicando que a incorporação desse resíduo não otimiza o empacotamento da massa cerâmica durante a conformação dos corpos de prova. Este fato pode ocasionar defeitos na peça como, por exemplo, trincas.

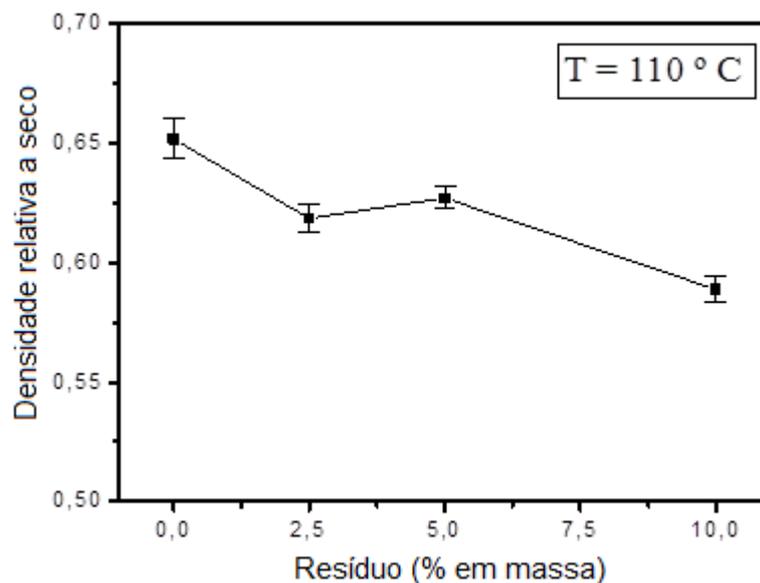


Figura 6.11- Densidade relativa a seco das composições.

6.2.3.3. Retração Linear de Queima

A Figura 6.12 apresenta a retração linear de queima (RLQ) dos corpos de prova. Estão representados no gráfico, os limites de retração linear de queima e a variação no tamanho da peça, segundo MÁS (2002).

Segundo Moraes (2013), durante a etapa de queima, além da sinterização, ocorrem decomposição e transformações de fases no material. A sinterização tende a fechar os poros dos corpos de prova conformados, o que gera uma retração linear na peça. Quanto mais avançada é a sinterização, maior será a retração linear.

Monteiro e Vieira (2002) citam que o mecanismo de RLQ deve-se, sobretudo, à aproximação e coalescência das partículas durante o processo de sinterização, mas que também a perda ao fogo contribui para o aumento desta propriedade.

Analisando a Figura 6.12, nota-se que nas temperaturas iniciais, 800 e 900°C, há variação insignificante da RLQ das composições com a incorporação do resíduo. Contudo, em 1000°C, a incorporação de resíduo acima de 2,5% aumenta a retração linear em 19%. Isto é consequência, possivelmente, dos mecanismos de sinterização que ocorrem em elevadas temperaturas e aproximam as partículas, causando assim uma maior retração.

Além disso, percebe-se que as peças queimadas a 800°C e 900°C não ultrapassaram 1% de retração, valor indicativo de poucas variações no tamanho da peça. E que as peças queimadas a 1000°C apresentaram variação acima de 2%, indicando elevada variação nas suas dimensões. A retração linear é um parâmetro tecnológico essencial para determinação das dimensões finais da cerâmica vermelha. Dessa forma, é almejado que os valores de retração linear de queima fiquem situados dentro de uma faixa estreita, de modo que garantam constância na obtenção de um produto de cerâmica vermelha de alta qualidade.

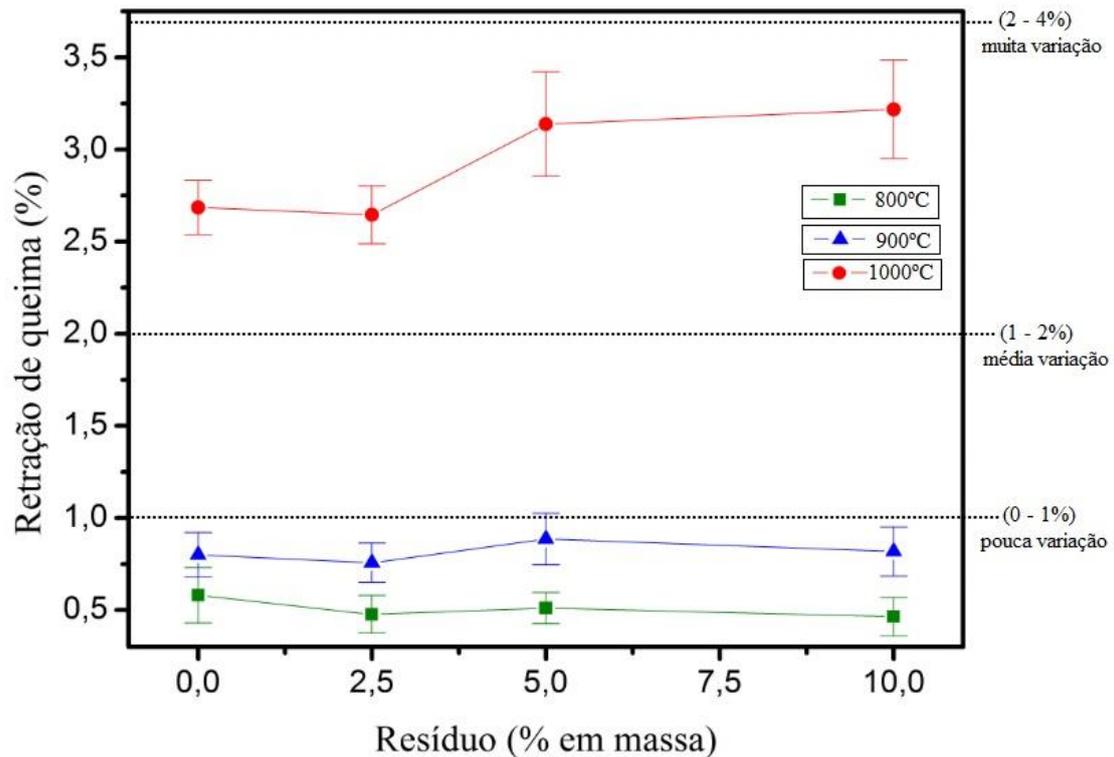


Figura 6.12- Retração linear de queima das composições nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C indicando a variação do tamanho da peça de acordo com MÁ S (2002).

6.2.3.4. Absorção de água

Na Figura 6.13 estão representados os valores das médias e desvios padrão da absorção de água para os corpos cerâmicos com as formulações estudadas para todas as temperaturas. É possível observar que com uma maior incorporação do lodo, ocorre um aumento na absorção de água. O aumento da absorção de água da cerâmica está associado com o aparecimento de porosidade aberta em função da queima do carbono e dos hidrocarbonetos, que estão presentes no resíduo, conforme indicado pela análise de DRX (FREITAS *et al.*, 2011 *apud* FARIA, 2015).

Além disso, percebe-se que quanto maior a temperatura de queima utilizada, menor a absorção de água. Por exemplo, as peças incorporadas com 5% de lodo e queimadas a 1000°C apresentaram uma redução de 17,8% na absorção de água quando comparadas com as peças queimadas a 800°C com o mesmo teor de resíduo. Isso ocorre possivelmente, porque o aumento da temperatura de queima causa um decréscimo da porosidade que ocorre como consequência das reações de sinterização, devido à maior formação de fase líquida, reduzindo assim a absorção de água (MONTEIRO; VIEIRA, 2002).

Para tijolos, segundo a norma NBR 15270-1 (ABNT, 2005), o índice de Absorção de água não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%. Dessa forma, é possível observar que apenas as peças queimadas a 1000°C e com até 5% de lodo incorporado se enquadraram nas normas para fabricação de tijolos. Já a norma NBR 15310 (ABNT, 2009) indica que o limite máximo admissível da absorção de água para telhas cerâmicas é de 20%. Desconsiderando a barra de erro, percebe-se que nenhuma das formulações, independente da temperatura de queima, se enquadram na norma para fabricação de telhas.

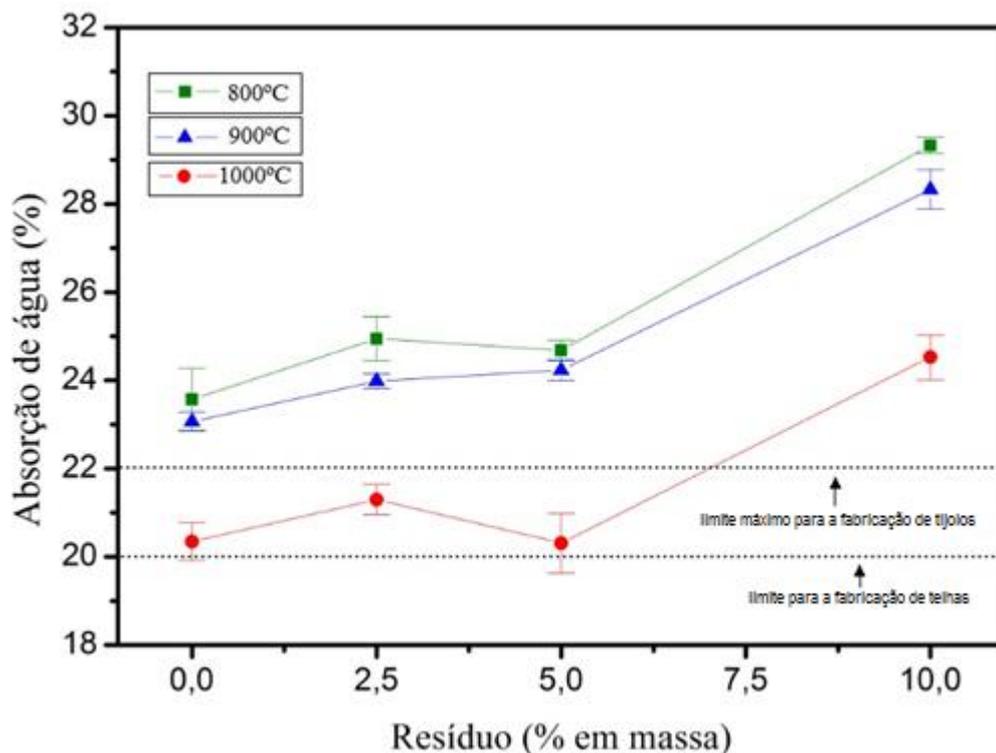


Figura 6.13- Absorção de água das composições nas temperaturas de 800,900 e 1000°C.

6.2.3.5. Tensão de ruptura à flexão

A Figura 6.14 apresenta os valores médios e desvios padrão da resistência mecânica das composições estudadas e queimadas nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C, em função do teor de lodo de ETE de lavanderia industrial incorporado na massa cerâmica.

Anteriormente, pôde-se observar que houve um aumento da absorção de água com a incorporação do lodo. Devido a esse acréscimo da absorção de água, era de se esperar uma redução na resistência à flexão da argila com adição do

resíduo, uma vez que, a absorção de água está associada à porosidade aberta da cerâmica e, portanto, às características microestruturais do interior das peças.

Além disso, nota-se que a resistência mecânica aumenta significativamente com o aumento de temperatura. Por exemplo, as peças sem adição de lodo, queimadas a 1000°C apresentaram um aumento de 110 % na tensão de ruptura à flexão quando comparadas com as peças queimadas a 800°C. Isto ocorre devido aos mecanismos de sinterização que possibilitam maior formação de fase líquida, reduzindo assim a porosidade do material e promovendo uma melhor consolidação das partículas.

Segundo Santos (1989) a resistência mínima desejada para fabricação de tijolos de alvenaria é de 2MPa, para tijolos furados é de 5,5MPa e para telhas é de 6,5MPa. Observa-se ao analisar a Figura 6.14 que todas as composições, independente da temperatura de queima, atingem os valores especificados para a fabricação de tijolos de alvenaria de 2,0MPa e que apenas as composições queimadas a 1000°C atingem o valor especificado para a fabricação de telhas de 6,5MPa. Além disso, todas as composições queimadas a 1000°C e as composições com até 5% de lodo incorporado, queimadas a 900°C atingem o valor especificado para a fabricação de tijolos furados de 5,5MPa.

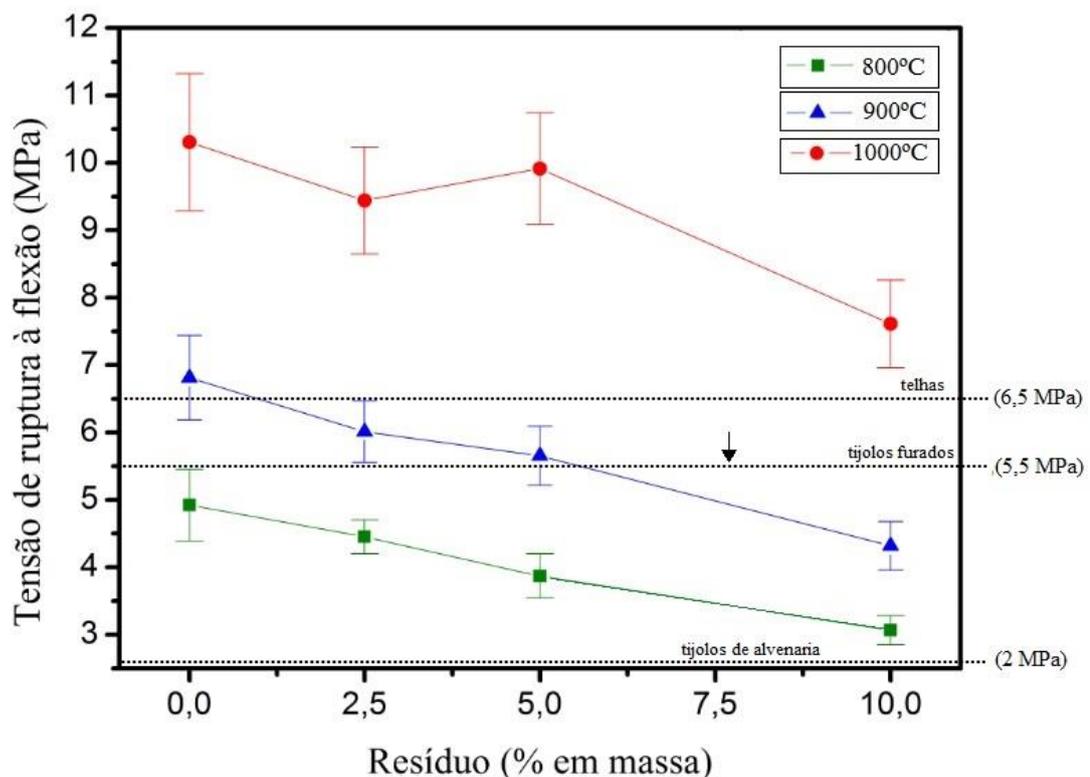


Figura 6.14- Tensão de ruptura à flexão das composições nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C.

6.2.4. Análise microestrutural

6.2.4.1. Microscopia óptica (MO)

As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam a análise microestrutural por microscopia óptica das cerâmicas queimadas a 800 e 1000°C com 0 e 10% de lodo de ETE de lavanderia industrial. O aspecto geral das microestruturas apresenta uma coloração avermelhada e uniforme, indicando que houve boa homogeneização da mistura o que pode refletir na resistência mecânica. A cor avermelhada das massas cerâmicas é devido à presença dos compostos de ferro, conforme indicado na composição química.

Na figura 6.15 pode-se observar possíveis grãos de quartzo com grande variação de tamanho que são identificados através dos círculos pretos, enquanto os círculos brancos evidenciam partículas mais escuras, que podem ser minerais ferromagnesianos. A argila apresenta também partículas avermelhadas, que são identificadas por setas pretas, possivelmente hematita, proveniente da desidratação do hidróxido de ferro, goethita, comum nas argilas de Campos dos Goytacazes-RJ (VIEIRA; MONTEIRO, 2002).

Além disso, verifica-se a evolução do grau de sinterização com o aumento da temperatura. Isto se deve à maior formação de fase líquida, responsável pela melhoria da densificação no corpo cerâmico, sendo possível observar uma superfície menos irregular e porosa.

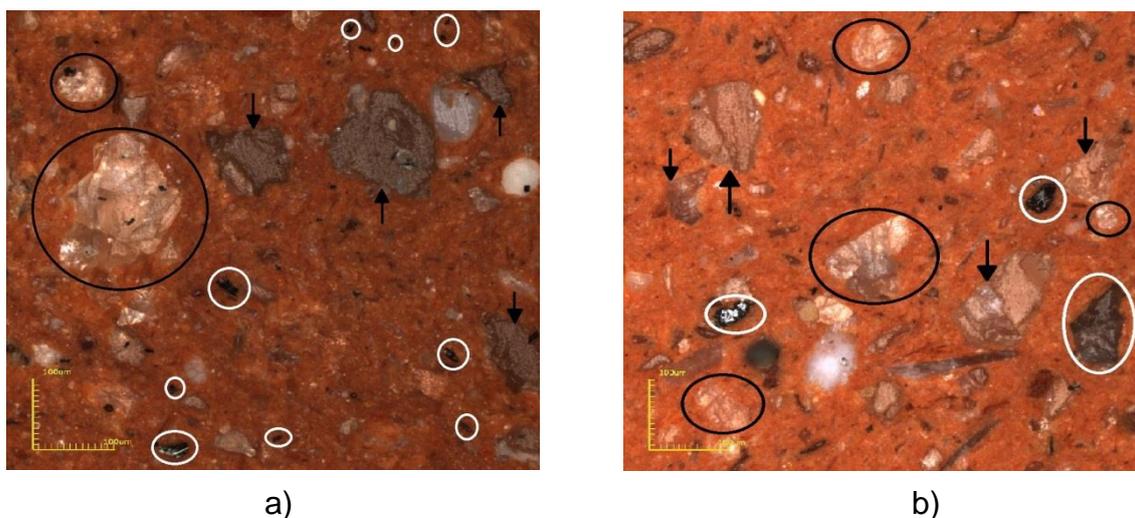


Figura 6.15 - Microscopia óptica, com aumento de 430x, das peças com 0% de lodo, queimadas a: a) 800°C b)1000°C.

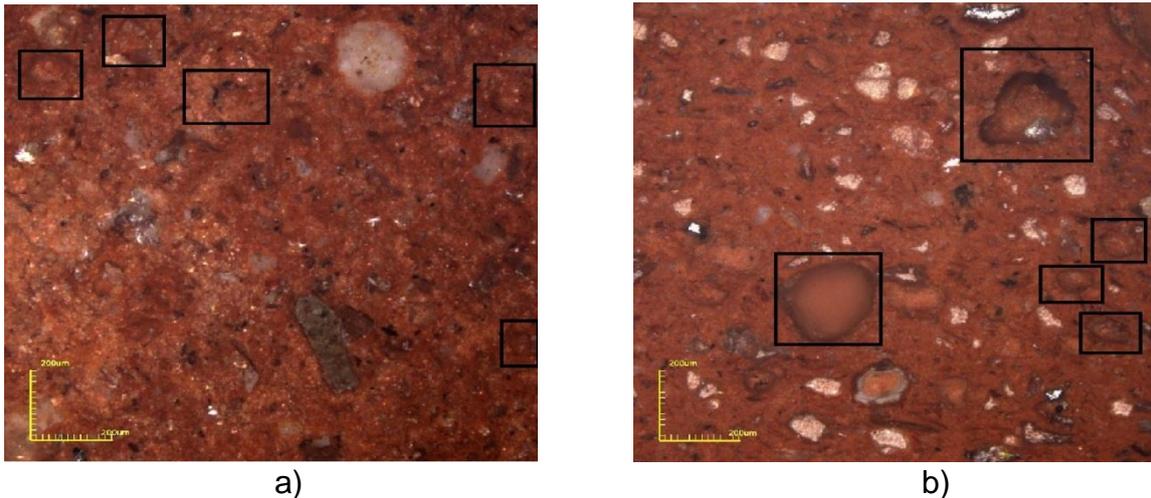


Figura 6.16- Microscopia óptica, com aumento de 216x, das peças com 10% de lodo, queimadas a: a) 800°C b)1000°C.

Comparando as Figuras 6.15 e 6.16, para as duas temperaturas de queima analisadas, é possível observar que a incorporação do lodo de lavanderia causou um aumento na quantidade de poros da cerâmica. Esses poros apresentam forma arredondada, e possivelmente foram formados pela decomposição da matéria orgânica presente no resíduo ou pela sua retirada durante a etapa de corte.

6.2.4.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As micrografias da superfície da cerâmica sem adição de resíduo, queimadas a 800°C e 1000°C, são mostradas, respectivamente, na Figura 6.17- a e b.

Analisando a micrografia da Figura 6.17-a, observa-se que o corpo de prova puro queimado a 800°C, apresenta uma textura grosseira, com baixa consolidação de partículas e porosidade interconectada, confirmando o comportamento refratário das argilas de Campos (MONTEIRO et al., 2006). Esses traços microestruturais são típicos da argila caulínica queimada nesta faixa de temperatura, porque a formação da fase líquida, mecanismo principal de consolidação das partículas, ainda não é suficiente para eliminar a porosidade aberta (VIEIRA et al., 2013). Comparando a figura 6.17-a e b, é possível notar que a cerâmica queimada a 1000°C apresenta uma microestrutura menos grosseira, devido aos mecanismos de sinterização que atuam nesta temperatura.

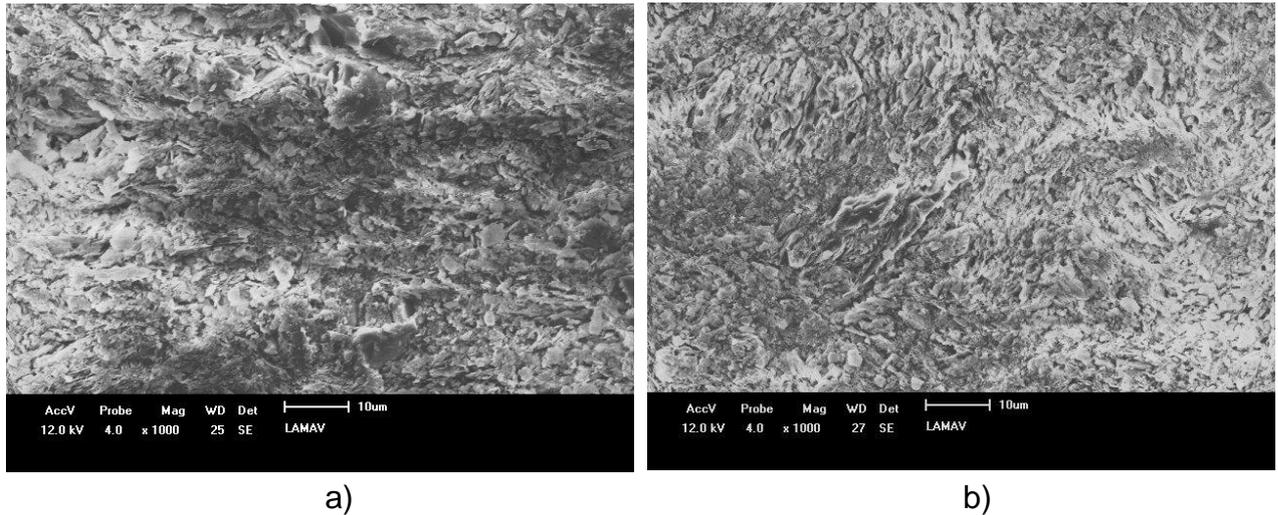


Figura 6.17 - Micrografias (MEV) da superfície da cerâmica sem adição de resíduo, com aumento de 1000x, em diferentes temperaturas. (a)800°C e (b)1000°C.

As micrografias da superfície da cerâmica com adição de lodo de 10%, queimadas a 800°C e 1000°C, são mostradas, respectivamente, na Figura 6.18-a e b. Comparando as Figuras 6.17 e 6.18, observa-se que as microestruturas da Figura 6.18, independentemente da temperatura, mostram um aumento na quantidade e tamanho dos poros devido à incorporação do resíduo. Isso ocorre, possivelmente, porque durante a queima a matéria orgânica presente no resíduo é volatilizada. A porosidade elevada nos corpos de prova acarretou um aumento nos valores de absorção de água, reduzindo a resistência do material cerâmico.

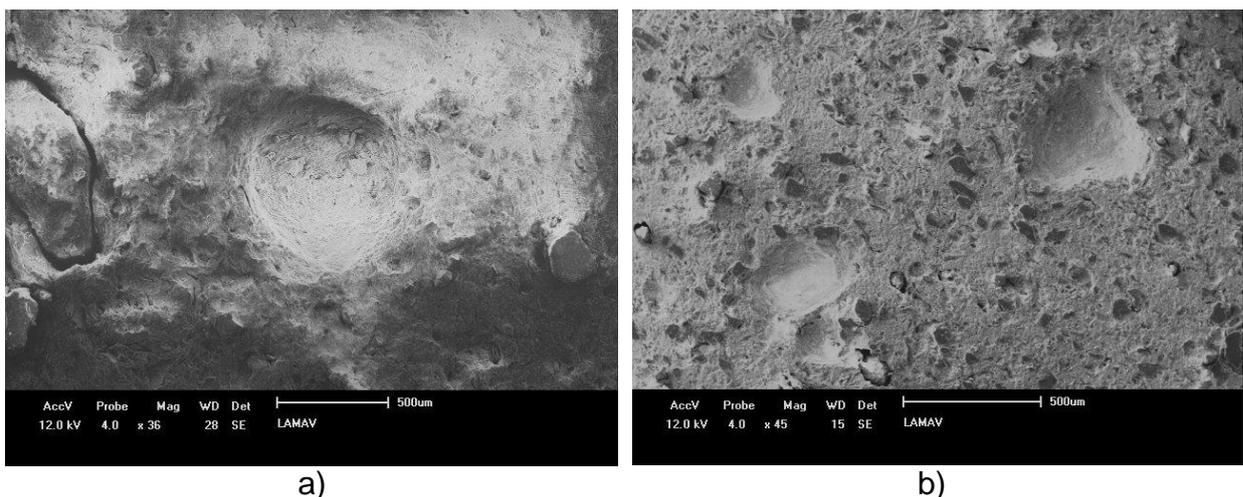


Figura 6.18 - Micrografias (MEV) da superfície da cerâmica com 10% de resíduo, com aumento de 45x, em diferentes temperaturas. (a)800°C e (b)1000°C.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Neste trabalho de avaliação do efeito da incorporação do lodo de ETE de lavanderia industrial na produção de produtos de cerâmica vermelha, foi possível concluir que:

- As argilas estudadas apresentaram composições químicas similares, tipicamente caulinítica, com elevado teor de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), que estão em sua maior parte combinados formando os aluminossilicatos, e baixo teor de óxidos fundentes (K_2O e Na_2O).
- A massa cerâmica utilizada, 75% de argila amarela e 25% de argila vermelha, é constituída por caulinita, quartzo, mica muscovita, gibbisita, goethita e feldspato, com larga distribuição de tamanho de partículas.
- O lodo de lavanderia apresenta em sua composição mineralógica calcita, heterosita, nordstrandita e quartzo. A composição química do resíduo estudado é constituída, predominantemente, por SiO_2 (29,52%), Al_2O_3 (26,56%) e CaO (6,11%).
- O lodo apresentou fração granulométrica concentrada na “fração areia” ($>20\mu\text{m}$) o que pode ter prejudicado algumas das propriedades mecânicas das peças cerâmicas, mas melhorado a trabalhabilidade da massa.
- Em relação às análises térmicas realizadas, o resíduo de lavanderia industrial, pode ser considerado um resíduo combustível, segundo a classificação de Dondi et al. (1997b), por liberar calor durante a etapa de queima.
- Quanto à plasticidade das formulações estudadas, apenas a formulação com 10% de lodo situou-se na região de extrusão aceitável no prognóstico de Atterberg. A adição do lodo como um material não-plástico acarretou diminuição do LP apresentando assim melhor trabalhabilidade da massa cerâmica que apresenta elevada plasticidade.
- No ensaio de densidade relativa a seco, a adição do resíduo nos percentuais indicados, promove uma redução da densidade relativa a seco, indicando que a incorporação desse resíduo alterou o empacotamento da massa cerâmica durante a conformação dos corpos de prova.

- Quanto ao comportamento de queima, de um modo geral, o incremento da temperatura aumentou a retração linear, diminuiu a absorção de água e aumentou a resistência mecânica das peças cerâmicas confeccionadas.
- Em relação à retração linear de queima, a incorporação do resíduo, considerando a barra de erro, não causou alteração significativa.
- Já a absorção de água é diretamente proporcional ao teor de lodo incorporado. Dessa forma, apenas as peças queimadas a 1000°C e com até 5% de lodo incorporado se enquadraram nas normas para fabricação de tijolos e nenhuma das formulações, independente da temperatura de queima, se enquadram na norma para fabricação de telhas.
- Os ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova por meio da incorporação de lodo de lavanderia com teores de 0 (referência), 2,5, 5 e 10% em peso comprovam que a resistência é inversamente proporcional ao teor de lodo incorporado. Mesmo assim, todas as composições, independente da temperatura de queima, atingem os valores especificados para a fabricação de tijolos de alvenaria de 2,0MPa e que apenas as composições queimadas a 1000°C atingem o valor especificado para a fabricação de telhas de 6,5MPa. Além disso, todas as composições queimadas a 1000°C e as composições com até 5% de lodo incorporado, queimadas a 900°C atingem o valor especificado para a fabricação de tijolos furados de 5,5MPa.
- As análises microestruturais por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram uma maior concentração de poros com a incorporação do lodo, fato que pode estar relacionado à volatilização da matéria orgânica constituinte do resíduo, que ocorre durante a queima.
- Dessa forma, as análises de superfície vêm comprovar o que foi observado nos ensaios realizados anteriormente. Conforme a quantidade de lodo incorporado em massa cerâmica é aumentada, a quantidade dos poros aumenta, facilitando a entrada de ar e água, causando diminuição da resistência e aumento da absorção.
- Assim, percebe-se que a incorporação do resíduo prejudica algumas propriedades do material cerâmico, porém esses resultados também são consequência da massa cerâmica com baixo teor de óxidos fundentes utilizada neste trabalho.

- Por fim, os resultados indicaram que o uso do lodo de ETE de lavanderia industrial na formulação de massa para a produção de cerâmica vermelha é viável até 5% de resíduo incorporado, ajustando-se principalmente à temperatura de queima das peças. Além de ser uma possível forma de dar um destino ambientalmente correto para esse resíduo, poupando aterros e outras técnicas de deposição.

CAPÍTULO 8

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Incorporar o lodo de lavanderia em uma massa cerâmica que possibilite um melhor ajuste da plasticidade e com maior quantidade de óxidos fundentes.
- Realizar análise de emissões de gases dos blocos cerâmicos com incorporação do lodo.
- Realizar ensaios de lixiviação e solubilização dos blocos cerâmicos com incorporação do lodo.
- Obter o poder calorífico e quantificar a matéria orgânica presente no resíduo.
- Realizar estudo de viabilidade econômica da incorporação do lodo em cerâmica vermelha.

CAPÍTULO 9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). Telhas – Termologia, requisitos e métodos de ensaio, NBR 15310, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Termologia e requisitos, NBR 15270-1, Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio, NBR 15270-3, Rio de Janeiro, 2005.

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

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004); Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, NBR 10005, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004); Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, NBR 10006, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004); Amostragem de Resíduos, NBR 10007, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). Compostagem, NBR 13591, Rio de Janeiro, 1996.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho, NBR 11175, Rio de Janeiro, 1990.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987). Argila, argamassas, concreto e cimento refratário – Determinação da retração linear após secagem, MB 305, Rio de Janeiro, 1987.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo - Análise Granulométrica – Métodos de ensaio, NBR 7181, Rio de Janeiro, 1984a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo – Determinação do limite de liquidez – Métodos de ensaio, NBR 6459, Rio de Janeiro, 1984b.

ABAJO, M. F. Manual Sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos. Ed. Beralmar S.A. Espanha, 2000.

ABCERAM, Associação Brasileira de Cerâmica. Disponível em: <<http://abceram.org.br/ceramica-vermelha/>>. Acesso: 3 de janeiro de 2017.

ALMEIDA, P. H. S. **Processo de solidificação/estabilização de lodo têxtil em matriz de argila-Influência do tipo de argila**. 2009. 101f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

AMARAL, L. F., Formulação de massa cerâmica para fabricação de telhas. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes. 2016.

AQUINO, R.C. et al. **Adição de resíduo de lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 10, n. 1, p. 29–35. 2015.

BABISK, M.P., **Incorporação de lama vermelha em cerâmica vermelha**. 2015. 216 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes.

BARROS, R. M. M. **Incorporação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo em formulações cerâmicas**. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

BITENCOURT, M.P. **Reaproveitamento do lodo gerado no processo de tratamento dos efluentes de lavanderia (tingimento e lavagem)**, Maringá/PR, 2002. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, 2002.

BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, J.E.W.A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo, Environmental Science & Technology, v. 34. 1993.

BRASIL. Lei n.º 12305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União - Seção 1, Página 3.

BRASIL. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.

BRITO, L. F. **Concepção e validação de protocolo para avaliar a estabilização por solidificação de resíduos**. Exame de qualificação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BUSS, M. V. et al. **Tratamento dos Efluentes de uma Lavanderia Industrial: Avaliação da Capacidade de Diferentes Processos de Tratamento**. Revista de Engenharia Civil IMED, V. 2, n. 1, p 2-10. 2015.

CARMO, D.L. **Tratamento de efluentes têxteis**. Rio de Janeiro: SENAI/CETIQT, 2001.

CARVALHO JÚNIOR, G. S. et al. **Atributos químicos de um latos solo vermelho tratado com resíduo têxtil**. Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia, v. 8, n. 1, p. 164-176, 2011.

CASTRO, T. M. **Solidificação/Estabilização de lodo gerado no tratamento de efluente de lavanderia industrial têxtil em blocos cerâmicos acústicos e seu desempenho em câmara reverberante**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

CASTRO, T. M. et al. **Caracterização de blocos cerâmicos acústicos produzidos com incorporação de lodo de lavanderia têxtil**. Engenharia Sanitária Ambiental, v.20, n.1, p. 47-54, 2015.

CERVANTES, T. N. M. et al. **Estudo da fotocatalise heterogênea sobre Ti/TiO₂ na descoloração de corantes sintéticos**. Química Nova, v.32, n.9, p. 2423-2428, 2009.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos sólidos industriais**. 2ª ed. rev. ampl. São Paulo: 233p. 1993.

COMPAM – COMÉRCIO DE PAPÉIS E APARAS MOOCA LTDA. **Resíduos**. 2006 Disponível em: < <http://www.compam.com.br/residuo.htm>> Acesso: 12 de jan. de 2017.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado** – 2ª ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

DIAS, C. A. C. M. **Reciclagem de lama de alto-forno em cerâmica vermelha**. 2011. 158p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes.

DIAS JÚNIOR, M. L. **Incorporação de lodo têxtil em blocos cerâmicos**. 2013. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2013.

DINIZ, A.F.M, MENESES, J. M. Utilização de lodo têxtil como adubo em cultura de *Pennisetum purpureum*. Revista Ambiental V.2, n. 1, p. 13 - 23, Out./15 a Jun./2016.

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

EMMANUEL, E. et al. **Ecotoxicological risk assessment of hospital wastewater: a proposed framework for raw effluents discharging into urban sewer network**. Journal of Hazardous Materials. A117, 2005.

FARIA JR., R. T. *et al.* **Photoacoustic analysis of trace gas emitted by ceramic industries in the northern region of Rio de Janeiro state**, *J. Phys.* IV 125 , p. 837-840. 2005.

FEITOSA, A. K.; BERWANGER, L.; HILGEMANN, M. **Análise de efluentes de uma lavanderia universitária**. *Perspectiva Online: Ciência exatas e engenharia*. V. 11, nº 5, p.17-23, 2015.

FUJITA, R. M. L.; JORENTE, M. J. **A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural**. *Revista ModaPalavra e-Periódico* vol.8, n.15, jan./jul.2015.

GUIMARÃES, C. A. de O., **Avaliação do ciclo de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha**. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes. 2017.

GUTBERLET, J. **O custo social da incineração de resíduos sólidos: recuperação de energia em detrimento da sustentabilidade**. *Revista Geográfica de América Central Número Especial EGAL*, 2011, Costa Rica II Semestre, 2011.

HALASZ M. R. T.; TOSATO Jr. J. C. **Tratamento de Efluentes Têxteis Utilizando Processos Físico-Químicos e Oxidativos Avançados**. 3º International Workshop advances in cleaner production. São Paulo, 2011.

HASSEMER, M. E. N. **Oxidação fotoquímica – UV/H₂O₂ – para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil**. 2006. Tese (Doutorado), UFSC, 2006.

HEREK, L. C. S. **Incorporação de lodo proveniente de lavanderia industrial em argila para a fabricação de tijolos**. 2009. Tese de Doutorado. Sc. UEM, Maringá PR, 2009.

HEREK, L. C. S. *et al.* **Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge**. *Ceramics International*, v. 38, p.951–959. 2012.

HOAG, L. S. A. **Reuso de água em hospitais: o caso do hospital ‘Santa Casa de Misericórdia de Itajubá’**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2008

IBAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. 2001. Disponível em: <http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/manual_girs.pdf> Acesso em: 12 de jan. de 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=330100>>. Acesso: 3 de fevereiro de 2017.

JÚNIOR, M. C. *et al.* **Argilas para cerâmica vermelha, rochas e minerais industriais** – CETEM, 2005.

KUNZ, A. *et al.* **Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis.** Revista Química Nova, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

LEAL, A. **Análise da disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Distrito de Pilar-Ba.** Revista de Comunicação e Cultura no Semiárido (ComSertões). 2016.

MALVIYA, R.; CHAUDHARY, R. **Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review.** Journal of Hazardous Materials B137, p. 267-276, 2006.

MARCHI, J. E. F. de. **A reciclagem como fonte de solução de problemas sócio ambientais/José Egidio Ferraz de Marchi.** Assis: Fundação educacional do Município de Assis, 2011

MARTINS, G. B. H. **Práticas limpas aplicadas às indústrias têxteis de Santa Catarina.** 1997, 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 1997.

MEDEIROS, L.C. **Adição de cascalho de perfuração da bacia potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos: influência da concentração e da temperatura de queima.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MENDES M. R. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de subproduto da mineração de carvão e de lodo de estação de tratamento de efluentes de indústria têxtil.** 1998. Monografia (Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas.** In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.2, p.303-313, 2002 Campina Grande, PB.2002

MILANEZ, K. W. *et al.* **Caracterização de pigmentos inorgânicos à base de Fe, Zn e Cr utilizando resíduo de galvanoplastia como matéria-prima.** Cerâmica, São Paulo, v. 51, p. 107-110. 2005.

MINEROPAR – Minerais do Paraná S/A. Indústria da Cerâmica Vermelha. Disponível em: < http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/relatoriosconcluidos/09_relatorios_concluidos.PDF> Acesso em: 11 jan. 2017.

MIRANDA, P. H.; NUNES, R.; SUELA, S. **Solidificação/Estabilização.** Disponível em: < <https://prezi.com/vnqilscxxlz6/solidificacao-estabilizacao/>> Acesso em: 30 de Janeiro de 2017.

MONTEIRO S.N., SILVA F.A.N., VIERA C.M.F. **Microstructural evaluation of a clay ceramic incorporated with petroleum waste.** Applied Clay Science; v. 33; P. 171-180. 2006.

MORAES, J. L. **Dificuldades para o aproveitamento energético de resíduos sólidos através da incineração no Brasil.** Geosaberes, v. 6, número especial (3), p. 173 - 180, Fortaleza.Fevereiro. 2016

MORAIS, A. S. C. **Incorporação de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente em cerâmica vermelha.** Tese de doutorado, Universidade estadual norte fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MOTTA, J.F.M., et al. **As matérias-primas cerâmicas. Parte 1: O perfil das principais matérias-primas cerâmicas e seus produtos.** Cerâmica Industrial, v.6, n.2, pp 28-39, 2001.

MPHEKGO, P. M., CLOETE, T.E. **Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: Are simplicity and cost-effectiveness the only advantages?** Environmental Science & Bio/Technology, n. 3, pp. 349-360. 2004.

MYMRIN, V., et al. **Red ceramics enhancement by hazardous laundry water cleaning sludge.** Journal of Cleaner Production, v.120, pp.157-163.2016.

OLIVEIRA, D. M. **Aplicação da Técnica de Solidificação/Estabilização Para Resíduos Oleosos da Indústria Petrolífera, Utilizando Solo Argiloso e Bentonita.** Florianópolis/SC, 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

PAUDYN, K. et al. **Remediation of hydrocarbon contaminated soils in the Canadian arctic by landfarming.** Cold Regions Science and Technology, pp.1-13. 2007.

PINTO, F. A. R. **“Resíduos sólidos industriais: Caracterização e gestão. O caso do estado do ceará”.** 2004. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Ceará, UFC. 2004.

POLLI, A. **Gerenciamento de impactos ambientais em lavanderias têxteis.** Revista brasileira de gestão ambiental GVAA- Grupo verde de agroecologia e abelhas, Pombal – PB. V. 7, n. 2, p. 12 - 18, abr - jun, 2013.

PRIM, E. C. C. **Reaproveitamento do Lodo da Indústria têxtil como Material de Construção Civil - Aspectos Ambientais e Tecnológicos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

QUEZADO, L. H. N. **Avaliação de tecnologias para aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.** Monografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

RAMOS, I. S.; ALVES, M. G.; ALEXANDRE, J. **Diagnóstico do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ.** Cerâmica Industrial, v. 11, nº 1, p. 28-32, 2006.

RAMOS, I. S. et al. **A indústria cerâmica vermelha de Campos dos Goitacazes e a inclusão social das artesãs da baixada campista através do projeto Caminhos de Barro.** Cerâmica, v. 54, p 280-286, 2008.

RAMOS, F. M. S. *et al.* **Avaliação da técnica de solidificação/estabilização no tratamento de resíduo têxtil - produção de bloco cerâmico de vedação.** Cerâmica, v. 55, p. 408-414, 2009.

RIBEIRO, F. **Cerâmicas substituem usinas e salvam a lavoura da Baixada.** Monitor Campista, Campos dos Goytacazes, 23 dez. 2002. Economia, p. 3.

RIBEIRO, M. M. **Material particulado da planta de sinterização de usina siderúrgica integrada em composição de massa de cerâmica vermelha.** 2010. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes.

RIBEIRO, D.; MOURA, L. S.; PIROTE, N. S. **Sustentabilidade: Formas de Reaproveitar os Resíduos da Construção Civil.** Rev. Cienc. Gerenc., v.20, n.31, p.41-45, 2016.

ROCHA, G.N.; GONÇALVES, J.L.M. & MOURA, I.M. **Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de Eucalyptus grandis fertilizado com biossólido.** R. Bras. Ci. Solo, 28: 623-639, 2004.

ROSA, E. V. C. da. **Reaproveitamento de lodo têxtil em solo florestal: estudos dos aspectos físicos-químicos, agronômicos, e ecotoxicológicos.** 2004. 139 f. Tese (Doutorado em Química) – Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SANTOS, P. de S. Tecnologia de argilas: Fundamentos. Edgard Blücher Editora Ltda, São Paulo, vol. 1, 1989

SANTOS, T. B.; MOURA, G. J.; SILVA, A. K. **Reciclagem industrial como agente propulsor da preservação dos recursos naturais.** R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n.1, p. 395-410, abr./set. 2016.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Conheça as associações e as entidades da moda no Brasil.** Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/Conhe%C3%A7a-as-associa%C3%A7%C3%B5es-e-as-entidades-da-moda-no-Brasil>>. Acesso em: 16 set. 2015b.

SILVA, L. J. **Processo de Landfarming para Tratamento de Resíduos Oleosos.** Dissertação de Mestrado – Escola de química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2009.

SILVA, M. A.R. **Solidificação e estabilização de resíduos inorgânicos industriais: estudo da eficiência do processo e evidência de mecanismos de imobilização.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina –UFSC, Florianópolis, 2007.

SIMNETE, M. A. **Alterações nas propriedades químicas de um argissolo adubado com lodo de esgoto e desenvolvimento e acúmulo de nutrientes em**

plantas de milho. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2001. 89p. (Tese de doutorado)

SOARES, Karine Fonseca. **Incorporação do resíduo proveniente da estação de tratamento de efluente da indústria têxtil em matriz cerâmica.** 2016. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S.R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. **Reuse of Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) to produce ceramic materials.** Journal of Environmental Management. Ed. 92, p. 2774 - 2780. 2011.

SOUZA, C.C. **Efeito da incorporação de resíduo de minério de ferro nas propriedades e na microestrutura de cerâmica argilosa do município de Campos dos Goytacazes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual Norte Fluminense – UENF, 2007.

SOUZA C. R. B., *et al.* **Análise de viabilidade econômica para implantação de um secador de tijolos em uma cerâmica em Campos dos Goytacazes/RJ.** IV Encontro Fluminense de Engenharia de Produção, Volta Redonda-RJ. 2013.

VIEIRA, C. M. F. **Cerâmica Argilosa Incorporada com Resíduo Oleoso Proveniente do Setor Petrolífero.** Revista Matéria, v. 11, n. 3, p. 217 – 222. 2006.

VIEIRA, C. M. F., BORLINI, M. C., MONTEIRO, S. N. (2007). **Characterization of Clayey Ceramic Incorporated with Eucalyptus Firewood Ash.** In: TMS 2007 - 136th Annual Meeting & Exhibition, Orlando. In: TMS 2007 - 136th Annual Meeting & Exhibition. Warrendale, PA: THE MINERALS, METALS & MATERIALS SOCIETY. v. 1. p. 180-180.

VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N. **Incorporation of solid wastes in red ceramics – an updated review.** Revista Matéria, v. 14, n. 3, pp. 881 – 905, 2009.

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

VIEIRA, C.M.F., *et al.* **Recycling of electric arc furnace dust into red ceramic.** Journal of Materials Research and Technology; v. 2; p. 88-92, 2013.