

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE

ELÍSIO LUÍS GONZAGA DA SILVA

**USO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
CARGA EM CORPOS CERÂMICOS**

São Luís

2014

ELÍSIO LUÍS GONZAGA DA SILVA

**USO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
CARGA EM CORPOS CERÂMICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Energia e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Adeilton Pereira Maciel

São Luís

2014

Silva, Elísio Luís Gonzaga da.

Uso de resíduos sólidos de estação de tratamento de água como carga em corpos cerâmicos/ Elísio Luís Gonzaga da Silva. – São Luís, 2014.

98 f.

Impresso por computador (fotocópia).

Orientador: Adeilton Pereira Maciel.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente, 2014.

1. Resíduo sólido. 2. Cerâmica vermelha. 3. Reciclagem. I. Título.

CDU 628.312.1

ELÍSIO LUÍS GONZAGA DA SILVA

**USO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
CARGA EM CORPOS CERÂMICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Energia e Ambiente.

Aprovada em: / /

BANCA EXAMINADORA:

(Orientador - UFMA)

Prof. Dr. ADEILTON PEREIRA MACIEL

Prof. Dr.

Prof. Dr.

À minha mãe, Teresa de Jesus Nunes (in memoriam), por ser a mulher mais humilde, sábia e forte que conheci e pelo amor, paciência e disciplina ofertada a mim. Obrigado por fazer parte da minha vida e ter provocado em mim um profundo desejo de conhecer as leis da ciência e da natureza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente ao Eterno pela força, coragem e dedicação durante toda essa jornada.

Aos meus pais (in memoriam) pelo incentivo recebido durante toda minha vida, e por ter provocado em mim o desejo de tornar-me um profissional da educação.

A toda a minha família e amigos pelo apoio e compreensão dos meus muitos isolamentos durante a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Doutor Adeilton Pereira Maciel (orientador) obrigado pela forma como orientou o meu trabalho. Agradeço suas recomendações, pelas sugestões dadas durante a redação desta dissertação, sua cordialidade com que sempre me recebeu e pela liberdade de ação que tive durante a execução desta dissertação, contribuindo para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão (PPGEA) pelo apoio total dado na execução desta obra escrita.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA na pessoa do professor Aranai Rabelo Costa pelo suporte na execução desta obra dissertativa; do professor José Hilton Gomes Rangel, por nos conceder o laboratório de química e o forno mufla; da professora Adriany Serra do Nascimento, por nos conceder o lodo de ETA e suporte na execução desta pesquisa; do professor Antonio Ernandes Macedo Paiva, por nos conceder o laboratório de mecânica onde pudemos realizar todos os ensaios tecnológicos deste trabalho; ao professor José Manuel Rivas Mercury por nos conceder o laboratório de química e argila usada neste trabalho.

“Só há duas maneiras de viver a vida: a primeira é vivê-la como se os milagres não existissem. A segunda é vivê-la como se tudo fosse milagre.”

Albert Einstein

RESUMO

O objetivo deste estudo foi a utilização de lamas geradas nos decantadores de Estação de Tratamento de Água, por meio de sua incorporação em argila, caracterizando e avaliando os efeitos desse procedimento na fabricação de cerâmica vermelha. Para atingir a finalidade da pesquisa foi utilizado lodo gerado na ETA do Sacavém, São Luís - MA e argila vermelha de Imperatriz - MA. A metodologia consistiu de ensaios de caracterização do lodo seco e da argila seca por Difração de Raios X, Fluorescência de Raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura, Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica. Foram incorporados 5, 10, 15, 20 e 25% da massa do lodo na massa argilosa. Foram confeccionados 62 corpos de prova por prensagem uniaxial a 40 MPa e tratados a 950°C por 3 horas. Foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas dos corpos por meio dos seguintes ensaios: Retração Linear de Queima, Absorção de Água, Tensão de Ruptura à Flexão, Porosidade Aparente, Perda ao Fogo e Massa Específica Aparente. Foi observado pela análise química de DRX que os componentes predominantes em forma de óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 correspondem a aproximadamente 91% da composição do lodo e 89,2% da composição da argila, o que pode ter propiciado resultados positivos no processamento das misturas do lodo e argila e nas propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova. Os resultados demonstraram que os valores de absorção de água variaram de acordo com os teores do lodo de ETA aplicados na argila e que todos os corpos de prova apresentaram valores de absorção de água inferiores a 25%, máximo permitido para produção de corpos cerâmicos. Verificou-se que os corpos de prova com a adição de até 15% de lodo na argila podem ser usados para fabricação de tijolos maciços.

Palavras chave: resíduos sólidos, cerâmica vermelha, reciclagem.

ABSTRACT

The aim of this study was the use of sludge generated in decanters of Water Treatment Station, through its incorporation in clay, characterizing and assessing the effects of this procedure in the manufacture of Red pottery. To achieve the purpose of the research was used mud generated in ETA of Sacavém, São Luís-MA and red clay of Imperatriz-MA. The methodology consisted of dry sludge characterization tests and dry clay by X-Ray Diffraction, X-Ray Fluorescence, Scanning Electron Microscopy, Thermogravimetric and Differential Thermal Analysis. Were incorporated 5, 10, 15, 20 and 25% of the weight of the mud in clay mass. 62 samples were made by uniaxial pressing the 40 MPa and heat treated at 950° C for 3 hours. Were determined the physical and mechanical properties of bodies through the following tests: Linear Firing Shrinkage, Water Absorption, Flexural Tensile, Apparent Porosity, Loss by Fire and Apparent Mass Specific. It was observed by chemical analysis of DRX predominant components in the form of oxides SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 correspond to approximately 91% sludge composition and clay composition 89,2%, which may have provided positive results in the processing of mixtures of mud and clay and the physico-mechanical bodies of evidence. The results showed that the water absorption values varied according to the levels of the ETA apply sludge on clay and that all the bodies showed evidence of water absorption values below 25%, maximum allowed for production of ceramic bodies. It was found that the samples with the addition of up to 15% of sludge on the clay can be used for manufacture of solid bricks.

Key words: solid waste, red pottery, recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Síntese das etapas de tratamento de água de uma ETA convencional.	25
Figura 2. Diagrama de blocos com a sequência experimental da pesquisa.....	39
Figura 3. Amostra de lodo usada neste trabalho (A). Argila tratada usada neste trabalho (B).	41
Figura 13. Corpo de prova submetido à força flexão de ruptura em três pontos.	44
Figura 14. Corpos de prova após o ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão.....	48
Figura 15. Corpos de prova após o ensaio da Balança Hidrostática.	49
Figura 4. Porção de argila na cuba de alumina.....	51
Figura 5. Processo em peneira com 0,250 mm de abertura.	52
Figura 6. Processo de homogeneização manual da água na argila.....	53
Figura 7. Porção de lodo no processo de moagem.	54
Figura 8. Corpos de prova após o processo de prensagem.	59
Figura 9. Corpos de prova após o processo de secagem.	60
Figura 10. Curva de Queima dos corpos de prova.	60
Figura 11. Disposição dos corpos de prova dentro do forno mufla.....	61
Figura 12. Corpos de prova após o processo de queima.	61
Figura 16. Difratoograma de raios X do lodo.....	64
Figura 17. Difratoograma de raios X da argila.	65
Figura 18. TG e DTG do lodo de ETA.....	66
Figura 19. Micrografias obtidas por MEV lodo de ETA.....	67
Figura 20. Micrografias obtidas por MEV da argila.	67
Figura 21. Variação da TRF em função da percentagem de lodo na argila.....	68
Figura 22. Absorção de Água em função da porcentagem de lodo na argila.	71
Figura 23. Porosidade Aparente em função da porcentagem de lodo na argila.	72
Figura 24. Faixa de variação da PA das argilas-padrão brasileiras após queima a 950°C.....	73
Figura 25. Retração Linear de Queima em função da adição de lodo na mistura de argila.	74
Figura 26. Massa Específica Aparente em função da adição de lodo na mistura de argila.	75
Figura 27. Faixa de variação da MEA das argilas-padrão brasileiras após queima a 950°C.....	76
Figura 28. Perda ao Fogo em função da adição de lodo na mistura de argila.	77

Figura 29. Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão nos CPs de argila pura.	91
Figura 30. Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão nos CPs com 5% de lodo.....	92
Figura 31. Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão nos CPs com 10% de lodo.....	92
Figura 32. Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão nos CPs com 15% de lodo.....	92
Figura 33. Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão nos CPs com 20% de lodo.....	92
Figura 34. Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão nos CPs com 25% de lodo.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. NBR 7170 - Resistência mínima à compressão em tijolos comuns.	31
Tabela 3. Ensaio tecnológico de TRF realizados em 31 corpos de prova.....	47
Tabela 4. Ensaio tecnológico de AA, MEA, PA realizados em 31 corpos de prova.	49
Tabela 5. Ensaio tecnológico de RLQ e PF realizados em 62 corpos de prova.	50
Tabela 2. Identificação dos 62 corpos de prova gerados.....	57
Tabela 6. Óxidos dos elementos químicos da argila e do lodo detectados por ED-XRF.....	62
Tabela 7. Ensaio após a queima nos corpos de prova de argila pura.....	85
Tabela 8. Ensaio após a queima nos corpos de prova incorporados com 5% de lodo.....	86
Tabela 9. Ensaio após a queima nos corpos de prova incorporados com 10% de lodo.....	86
Tabela 10. Ensaio após a queima nos corpos de prova incorporados com 15% de lodo.....	87
Tabela 11. Ensaio após a queima nos corpos de prova incorporados com 20% de lodo.....	87
Tabela 12. Ensaio após a queima nos corpos de prova incorporados com 25% de lodo.....	87
Tabela 13. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs de argila pura.....	88
Tabela 14. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 5% de lodo.....	89
Tabela 15. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 10% de lodo.....	89
Tabela 16. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 15% de lodo.....	90
Tabela 17. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 20% de lodo.....	90
Tabela 18. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 25% de lodo.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AA** - Absorção de Água
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
APL - Arranjo Produtivo Local
ASTM - American Society for Testing Materials (Sociedade Americana de Ensaio de Materiais)
CAEMA - Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão
CLQ - Contração Linear de Queima
CNUMAD - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP - Corpo de Prova
CPMR - Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais
DSC - Differential Scanning Calorimetry (Calorimetria Exploratória Diferencial)
DTA - Differential Thermal Analysis (Análise Térmica Diferencial)
ED-XRF - Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia)
ETA - Estação de Tratamento de Água
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
FEG - Field Emission Gun (Canhão de Emissão de Campo)
ICDD - International Center for Diffraction Data (Centro Internacional para Dados de Difração)
IFMA - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão
JCPDS - Joint Committee on Powder Diffraction Standards (Comitê para Padrões de Difração de Pó)
kV - quilovolts
LETA - Lodo de Estação de Tratamento de Água
mA - miliAmpère
MEA - Massa Específica Aparente
MEV - Scanning Electron Microscopy (Microscopia Eletrônica de Varredura)
MME - Ministério de Minas e Energia
MPa - Megapascal
Mt - Megatonelada
NBR - Norma Brasileira
PA - Porosidade Aparente
PF - Perda ao Fogo
PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos
PNRS - Política Nacional de Recursos Sólidos
PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RLQ - Retração Linear de Queima
TG - (Thermogravimetric Analysis) Análise Termogravimétrica
TRF - Tensão de Ruptura à Flexão
WD-XRF - Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence (Fluorescência de Raios X por Dispersão de Comprimento de Onda)
XRD - (X-Ray Diffraction) Difração de Raios X
XRF - (X-Ray Fluorescence) Fluorescência de Raios X

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 Geral.....	20
2.2 Específicos.....	20
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1 Lodos de ETA como resíduos sólidos industriais	21
3.2 Legislação nacional sobre os resíduos sólidos industriais	21
3.3 A Agenda 21 e os resíduos sólidos.....	23
3.4 Processos usuais de tratamento de água em ETA.....	24
3.5 Lodos gerados nos decantadores e nos filtros	26
3.6 Estimativas para produção de lodo de ETA	27
3.7 Alternativas para o descarte final do lodo de ETA	27
3.8 Argilas e materiais cerâmicos	29
3.9 Produção nacional de argila.....	30
3.10 Tijolos maciços	31
3.11 Normas aplicadas na fabricação de tijolos e telhas.....	31
3.12 Moagem e prensagem da massa cerâmica	32
3.13 Tratamento Térmico	33
3.14 Ensaios tecnológicos	34
3.15 Caracterizações térmicas das amostras.....	35
3.16 Técnicas espectrométricas.....	35
3.16.1 Fluorescência de Raios X.....	36
3.16.2 Difração de Raios X.....	36
3.16.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	37
4 METODOLOGIA	39
4.1 Obtenções das matérias-primas	41
4.2 Caracterizações das amostras de lodo e argila.....	41
4.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios - X	42
4.2.2 Difractometria de Raios X	42

4.3	Análise térmica do lodo	42
4.4	Procedimentos para os ensaios tecnológicos após a Queima.....	43
4.4.1	Tensão de Ruptura à Flexão	43
4.4.2	Retração Linear após Queima	44
4.4.3	Absorção de Água.....	44
4.4.4	Porosidade Aparente e Massa Específica Aparente	45
4.4.5	Perda ao Fogo.....	46
4.5	Ensaio tecnológico realizados nos corpos de prova	47
4.5.1	Ensaio tecnológico de TRF.....	47
4.5.2	Ensaio tecnológico realizados com a Balança de Arquimedes	48
4.5.3	Ensaio tecnológico de RLQ e PF	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	Preparação da amostra de argila	51
5.1.1	Processo de Moagem	51
5.1.2	Processo de Peneiramento	52
5.1.3	Preparação da argila pura para a confecção dos corpos de prova.....	52
5.2	Preparação da amostra do lodo de ETA	54
5.2.1	Processo de moagem e peneiramento do lodo	54
5.3	Misturas de lodo na argila	55
5.4	Preparação dos corpos de prova	56
5.4.1	Preparação dos corpos de prova de argila pura	56
5.4.2	Preparação dos corpos de prova de argila com lodo.....	57
5.5	Tratamentos térmicos dos corpos de prova.....	59
5.5.1	Processo de Secagem	59
5.5.2	Processo de Queima.....	60
5.6	Ensaio de caracterização.....	62
5.6.1	Fluorescência de Raios X	62
5.6.2	Difração de Raios X.....	63
5.6.3	Análises Térmicas	65
5.6.4	Microscopia Eletrônica de Varredura	66
5.7	Ensaio tecnológico	68

5.7.1 Ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão.....	68
5.7.2 Absorção de Água.....	70
5.7.3 Porosidade Aparente.....	71
5.7.4 Retração Linear após a Queima (RLQ)	73
5.7.5 Massa Específica Aparente.....	75
5.7.6 Perda ao Fogo.....	76
6 CONCLUSÕES	78
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXO A	85
ANEXO B.....	86
ANEXO C.....	88
ANEXO D	89
ANEXO E.....	91

1 INTRODUÇÃO

Grande parte das necessidades do homem, tais como saúde, alimentação, higiene pessoal e trabalho dependem basicamente da água doce, cujo estoque chega a 2,5% do volume total de água do planeta. Mesmo que haja uma capacidade de renovação, mediante processos naturais, sua reposição tem sido crescentemente comprometida por fatores como desmatamentos, exploração e poluição de mananciais. Sabemos que a água é um recurso que está cada vez mais escasso e que tem sido muito ameaçado pela ineficiência e desperdício de seu uso em empresas, indústrias e em diversas atividades humanas. A cada dia a água, bem indispensável à vida, vem sendo alvo de diversos tipos de poluição, demandando mais insumos para sua purificação e conseqüentemente, aumentando a geração de resíduos.

Geralmente, a água potável é obtida pela maioria das empresas de saneamento utilizando-se o processo convencional de tratamento de água em Estação de Tratamento de Água (ETA), cujas fases principais são: a captação, a coagulação, a floculação, a decantação, a filtração e desinfecção. Nesses processos são usados filtros e vários produtos químicos, conforme normas vigentes, para retirar da água impurezas e microrganismos nocivos à saúde humana (SCHWANKE, 2013). Porém, conseqüentemente é gerado um tipo de resíduo denominado Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) ou lodo de ETA. Esse subproduto é formado por sólidos, precipitados químicos e aglomerados orgânicos e inorgânicos, resultantes da reação entre os produtos químicos coagulantes usados na Estação de Tratamento e as impurezas contidas na água, pelo processo de floculação (REALI, 1999).

Segundo as normas vigentes no Brasil, os resíduos industriais sólidos não devem ser lançados na rede pública de esgotos ou nos corpos hídricos. Seu manejo e tratamento tornam-se uma responsabilidade da fonte que os gerou (BRASIL, 1998). Os resíduos industriais são gerados em enormes quantidades no Brasil e no mundo e têm sido motivo de estudo por parte das indústrias e de centros de pesquisas na busca de soluções, que sejam ecologicamente corretas, viáveis e capazes de minimizar os impactos ambientais decorrentes da disposição destes resíduos no meio ambiente.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) contém instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao enfrentamento dos principais problemas ambientais. Principalmente, aqueles decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos. A PNRS prevê a prevenção, a redução na geração dos resíduos, propõe a prática de hábitos de consumo sustentável e instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos. Segundo essa política, a busca por soluções na área de resíduos reflete a demanda da sociedade que pressiona por mudanças motivadas pelos elevados custos socioeconômicos e ambientais e, se manejados adequadamente, os resíduos sólidos podem adquirir valor comercial, podendo ser utilizados em forma de novas matérias-primas ou novos insumos (BRASIL, 2010).

O programa de ação consensual, intitulado “Agenda 21 da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento”, centra-se também em áreas de programas relacionados com os resíduos, a saber: a redução ao mínimo dos resíduos, o aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos, a promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos resíduos, dá incentivo para que as diretrizes científicas e as pesquisas sobre os diversos aspectos do controle da poluição relacionada com os resíduos sejam decisivas para alcançar os objetivos do programa e sugere que os governos, os municípios e as autoridades locais, com a devida cooperação internacional, devam empreender pesquisas sobre essas questões de importância crítica. (AGENDA 21G, 1992).

No caso do tratamento de água, a maior parte das massas dos lodos em ETAs convencionais é acumulada nos decantadores e as outras parcelas de resíduos nos filtros. Dependendo do tipo de coagulante usado, os lodos dos decantadores podem conter hidróxidos de ferro ou de alumínio, partículas inorgânicas, colóides e resíduos orgânicos. No Brasil, há relatos de que algumas ETAs fazem a disposição final inadequada do seu lodo nos sistemas hídricos mais próximos ou são jogados em aterros sanitários, no solo ou submetidos a processos de incineração (CORDEIRO, 2001).

Preocupados com os impactos ambientais que podem ser decorrentes dessas ações, pesquisadores estão buscando alternativas de disposição, aproveitamento e uso benéfico desse resíduo, que além de vantagem econômica pode ser utilizado como insumo. Uma

alternativa interessante para a reciclagem desse resíduo e uma possível solução para destinação ambientalmente correta, que vem sendo considerada por diversos pesquisadores e acadêmicos, é a incorporação do lodo na cerâmica vermelha. Isso é possível em função de sua composição química, física e mineralógica ser muito semelhante a das argilas. Essa alternativa importante pode contribuir positivamente com a conservação dos mananciais utilizados pelas ETAs. Além disso, pode reduzir o consumo das argilas, aumentando a vida útil de aterros sanitários e para a melhoria da qualidade do solo (BIDONE et al., 2001).

O Estado do Maranhão está entre os principais polos produtores nordestinos de cerâmica vermelha, com destaques para as cidades de Itapecuru-Mirim, Timon/Caxias e Imperatriz. Neste trabalho estudamos uma alternativa ambientalmente correta para a destinação dos lodos de ETAs, por meio da sua utilização como carga em argila para produção de cerâmicas vermelhas e da avaliação de qualidade, por meio de requisitos técnicos, das peças obtidas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar a viabilidade de utilização do lodo sólido gerado em Estação de Tratamento de Água como carga em argila para a produção de cerâmicas vermelhas.

2.2 Específicos

Para atingir a finalidade da pesquisa, os objetivos específicos foram os seguintes:

- Caracterizar o lodo na tentativa de utilizá-lo na produção em blocos cerâmicos, especialmente tijolos maciços;
- Caracterizar uma amostra de argila oriunda da região de Imperatriz - MA utilizada na fabricação de cerâmica vermelha;
- Substituir uma parte das argilas que são utilizadas como matéria-prima da indústria cerâmica por lodo proveniente de Estação de Tratamento de Água e estudar suas propriedades mecânicas;
- Avaliar se as peças cerâmicas obtidas obedecem aos requisitos técnicos de qualidade e se são propícios para serem aproveitados como cerâmica vermelha.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Lodos de ETA como resíduos sólidos industriais

Atualmente percebe-se que a poluição causada pelos resíduos sólidos industriais ameaça a vida no planeta, contaminando o solo, o ar, as águas, a fauna e a flora, produzindo efeitos prejudiciais ao meio ambiente e a toda sociedade. Apesar de o progresso econômico acelerar o desenvolvimento de grandes indústrias e empresas, ele traz um aumento significativo na produção de resíduos sólidos.

Dentre os resíduos sólidos, o que merece atenção especial nesse estudo é o Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA).

De acordo com a NBR 10.004,

Resíduos sólidos industriais são todos os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos de água ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, p.1, 2004).

Os componentes que formam o lodo de ETA não são biodegradáveis. O lodo é rico em silicatos e em matéria orgânica e é acrescido de produtos resultantes dos reagentes químicos aplicados à água bruta durante o seu tratamento.

3.2 Legislação nacional sobre os resíduos sólidos industriais

O abastecimento de água deve está focado na qualidade do líquido a ser distribuído à comunidade. Para melhorar a qualidade da água bruta esta exige maiores concentrações de produtos químicos aplicados no seu tratamento e, como consequência, há um aumento

significativo do resíduo lodo, oriundos das Estações de Tratamento de Água (ETAs), os quais, geralmente, são gerados principalmente nos seus decantadores e na água de lavagens dos seus filtros. No Brasil o destino final do efluente lodo de ETA tem sido descartado indiscriminadamente na natureza, sendo lançados diretamente em cursos de água, podendo provocar alterações significativas no meio ambiente (CORDEIRO, 2001). Portanto, esse efluente pode afetar também o rio mais próximo, que pode se tratar do próprio manancial de abastecimento de água da estação de tratamento.

Numa ETA convencional a água bruta pode ser transformada em água potável passando pelos seguintes processos: Captação, Bacia de tranquilização, Coagulação/Floculação, Decantação, Filtração, Cloração, Alcalinização e Fluoretação. Após essas etapas a água está em condições de ser distribuída para a população (CARVALHO, 2010).

Do ponto de vista ambiental, esses resíduos de lodo são classificados pela NBR 10004 como sendo resíduos Classe IIA, não inertes, portanto, devem ser tratados e dispostos dentro dos critérios estabelecidos por esta norma (NBR 10004, 2004). Por outro lado, a resolução CONAMA 357/2005 e sua resolução complementar, a resolução CONAMA 430/2011, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (CONAMA, 2005; 2011).

Em 1997 foi criada a Lei 9.433, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e submete o lançamento indiscriminado dos lodos das ETAs nos corpos hídricos ao processo de outorga, assegurando o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e a diminuição dos impactos ambientais (BRASIL, 1997). Em concordância foi instituída a Lei nº 9.605/98 (BRASIL, 1998), que responsabiliza e prevê punição para os responsáveis pelo gerenciamento das ETAs que destinarem o lodo direta ou indiretamente em corpos de água. Numa tentativa de minimizar mais os danos causados pelas empresas ao meio ambiente, essa lei foi alterada pela nº 12.305/2010, mais restritiva, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e obriga as instituições poluidoras a destinar adequadamente seus resíduos poluentes e dispõe sobre os objetivos, instrumentos e responsabilidades do poder público, dos instrumentos econômicos aplicáveis e das diretrizes relativas à gestão integrada

e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Essa lei dá providência de que os resíduos sólidos ou semissólidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, precisam de métodos, soluções técnicas em face da melhor tecnologia disponível para a disposição final deste tipo de resíduo (BRASIL, 2010).

Segundo as normas estabelecidas pela Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde, toda água destinada ao consumo humano, distribuída coletivamente por meio de sistema ou solução alternativa coletiva de abastecimento de água, deve ser objeto de controle e vigilância da qualidade da água, portanto as ETAs devem atender aos procedimentos dessa legislação (BRASIL, 2011).

3.3 A Agenda 21 e os resíduos sólidos

A Agenda 21 global é um documento da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) ou Rio 92, acordada e assinada de forma consensual por governos e instituições da sociedade civil de 179 países, no Rio de Janeiro em 1992. Ela é uma proposta de como alcançar o desenvolvimento sustentável, ou seja, desenvolvendo os países sem destruir o meio ambiente e com maior justiça social. O programa concentra-se em diversos temas sobre sustentabilidade, como em possibilitar que a comunidade científica, tecnológica, formuladores de políticas integrados e outros profissionais deem contribuição mais aberta e efetiva aos processos de tomada de decisões relativas ao desenvolvimento e meio ambiente.

Além de centrar-se em áreas de programas relacionados com os resíduos, a saber: a redução dos resíduos; o aumento da reutilização e reciclagem; a promoção do depósito e tratamento dos resíduos e o controle das fontes de poluição industrial para proteger os recursos hídricos, o programa também dá incentivo para que as diretrizes científicas e as pesquisas sobre os diversos aspectos do controle da poluição sejam decisivas para alcançar os objetivos do programa. Sugere também que os governos, com a devida cooperação internacional, devam desenvolver pesquisas sobre questões de importância crítica, tais como opções para o depósito das lamas residuais em condições de segurança, tratamento

dos resíduos industriais e opções de tecnologias acessíveis e ambientalmente seguras (AGENDA 21G, 1992).

A Agenda 21 Brasileira em suas ações prioritárias, em conformidade com os princípios e acordos da Agenda 21 Global, no tema sobre Produção e consumo sustentáveis contra a cultura do desperdício, recomenda que se divulguem experiências inovadoras para que, em nível local, se adotem formas criativas de destinação dos resíduos (AGENDA 21A, 2004). No setor de saneamento a AGENDA 21 recomenda que se aprimorem técnicas e processos, estabelecendo metas factíveis para a solução do passivo ambiental, no referente à exigência de tratamento de esgotos; incentiva a reutilização da água de lavagem dos filtros, tendo como objetivo o uso racional da energia e que sejam instituídos metas para que as estações de tratamento de água introduzam sistemas de secagem do lodo dos decantadores, evitando o lançamento direto ao corpo receptor (AGENDA 21R, 2004).

3.4 Processos usuais de tratamento de água em ETA

Até chegar ao consumidor, a água passa por processos de tratamento. Basicamente, as etapas desse processo são descritas a seguir:

- **A captação**: geralmente realizada em mananciais próximos, como rios e lagos, por meio de bombeamento. É a etapa onde a água bruta é captada da fonte contendo sujeiras, tais como plásticos, metais, matérias orgânicas e depois enviadas para a adutora.
- **A bacia de tranquilização**: tem como objetivo diminuir a velocidade da água bruta recebida da adutora. Nela o líquido recebe um tratamento inicial, passando por grades que retêm as impurezas maiores. Nessa bacia, que também pode ser uma represa ou uma lagoa de oxidação, onde geralmente aplica-se cloro para matar micro-organismos presentes na água bruta e para ajudar na dissolução de metais que, porventura, vier junto com a água.
- **Floculação**: nos canais de coagulação são adicionados solução de sulfato de alumínio a fim de desestabilizar as partículas em minúsculos flocos. Uma vez nos tanques

floculadores, a água é agitada por motores e, com a diminuição de sua agitação, se dá o agrupamento das partículas suspensas e a formação de flocos.

- Decantação: os flocos mais densos se depositam no fundo dos decantadores, formando camadas de lodos, tornando a água que fica na superfície mais limpa.
- Filtração: a água da superfície segue, por meio de canaletas, para um conjunto de filtros formados por camadas de carvão mineral, areia, pedregulho e cascalho, onde são retidas as impurezas remanescentes da fase de decantação.
- Desinfecção: depois de filtrada, a água passa por um canal onde recebe um tratamento dosado de cloro (cloração), cal (alcalinização) e flúor (fluoretação).

Depois de tratada, a água é bombeada para grandes reservatórios, e depois, deslocada por meio de tubulações para reservatórios menores e elevados, por fim, distribuída (CARVALHO, 2010).

A Figura 1 apresenta o fluxograma de uma estação de tratamento de água convencional e suas etapas do tratamento.

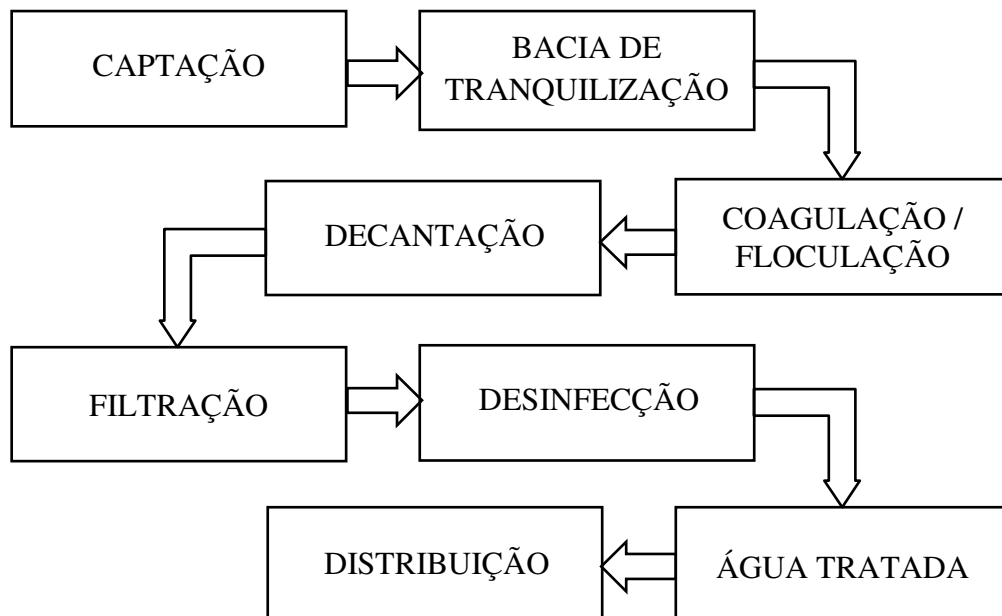


Figura 1. Síntese das etapas de tratamento de água de uma ETA convencional.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.5 Lodos gerados nos decantadores e nos filtros

Os resíduos dos decantadores e filtros de uma ETA são originados nas etapas de coagulação-floculação, sedimentação e filtração. A coagulação-floculação é uma das etapas do processo, para tornar a água potável. Porém, esse processo produz dois tipos de resíduos: o lodo oriundo dos decantadores e da água de lavagem dos filtros. O primeiro possui em sua composição materiais inertes, orgânicos e precipitados químicos, tais como hidróxido de alumínio e o segundo contem minúsculos flocos constituídos também por hidróxidos de alumínio, resíduos orgânicos e inorgânicos oriundos da água bruta e, eventualmente, por polímeros. O Brasil possui cerca de 7500 ETAs convencionais e há relatos que esses resíduos gerados nos filtros e decantadores das ETAs convencionais, são lançados sobre cursos de água aumentando mais os problemas ambientais (CORDEIRO, 2001).

Segundo Reali (1999), *“Os resíduos gerados nos decantadores, nos sistemas tradicionais, podem ficar retidos durante vários dias (30, 40, 60) ou algumas horas, dependendo da forma de limpeza utilizada nos tanques, e posteriormente lançados no ambiente, normalmente cursos d’água próximos às ETAs”*, sendo assim, os mananciais-fonte das ETAs, principalmente os rios, podem apresentar mudanças em sua turbidez, comprometendo a qualidade de suas águas, bem como sua fauna e flora.

Nas ETAs, a qualidade da água bruta captada em seus mananciais, os insumos e as dosagens utilizados em seu tratamento, podem influenciar nas características e na quantidade dos lodos produzidos. Os lodos de decantadores, dependendo do tipo de coagulante usado, podem ter em sua constituição os hidróxidos de ferro, ou alumínio, partículas inorgânicas, coloides e resíduos orgânicos, como algas, bactérias e protozoários. As Estações de Tratamento que utilizam o alumínio como coagulante, produzem lodo de cor marrom e as que empregam sais de ferro, geralmente, possuem cor marrom-avermelhada (REALI, 1999).

3.6 Estimativas para produção de lodo de ETA

Hoppen (2004) observou que o Sistema de Tratamento de Água de Passaúna, em Curitiba, foi projetado para possuir uma capacidade total de tratamento de ETA convencional de cerca de 2400 L/s e produzir cerca de 1,8 t de lodo por dia. Considerando que existem cerca de 7500 ETAs de ciclo completo ou convencional no Brasil e que cada uma produza 1,8 t de lodo por dia, estima-se que pode haver uma produção nacional mensal de 405000 t de lodo com possibilidades de serem lançados em cursos de águas brasileiras.

Segundo a Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão (CAEMA) a ETA do Sacavém, que é abastecida pela Barragem do Batatã, Rio do Prata e Mãe Isabel, possui 8 filtros que são lavados diariamente com apenas 100 m³ de água e tem capacidade de projeto de 600 L/s, porém, atualmente só trata 260 L/s devido à falta de água. A frequência de lavagem dos decantadores é trimestral, sem aferição do volume de lodo que é descarregado. Considerando que uma ETA convencional, projetada para uma capacidade total de tratamento de 2400 L/s produza 1,8 t de lodo por dia, estima-se que a ETA do Sacavém, se operasse com toda sua capacidade de projeto, poderia produzir 13,5 t de lodo por mês. Com a sua capacidade atual é estimado uma produção mensal de 5,85 t de lodo. Das ETAs existentes no Maranhão, segundo a CAEMA, 31 são convencionais. Com base nestes dados, estima-se, portanto, que todas as ETAs convencionais do Maranhão podem produzir cerca de 1674 t de lodo por mês.

3.7 Alternativas para o descarte final do lodo de ETA

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, existem 66 Estações de Tratamento de Água em operação no Maranhão. Dos 217 municípios existentes no Maranhão, 27 geram lodos oriundos de ETAs, sendo que 13 municípios destinam esses resíduos em rios, 12 municípios destinam os destinam em terrenos, porém, nenhum município os incinera, nem os joga em aterro sanitário e nem faz o reaproveita (IBGE, 2008).

Diversos métodos alternativos têm sido empregados para o descarte final de lodos de ETA, tais como: encaminhamento do lodo às Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs),

lançamento em redes coletoras, em lagoas com largo tempo de detenção, disposição em aterro sanitário de lixo urbano, incineração e uso agrícola (CORDEIRO, 2001). No entanto, alguns desses procedimentos para a gestão do lodo de ETA podem tornar-se atividades complexas com custos operacionais elevados.

As pesquisas sobre a utilização do lodo na indústria cerâmica para a confecção de artefatos cerâmicos são importantes, pois objetivam a preservação do planeta, a sustentabilidade e a economia dos recursos naturais, minimizando assim o descarte de resíduos sólidos industriais. Algumas pesquisas vêm sendo executadas, do ponto de vista ambiental, para a disposição final do lodo de ETA como, por exemplo, no uso da construção civil, em pavimentos, usos em solo, em cimento e em materiais cerâmicos como exemplo, em tijolos (BOSCOV, 2008). Outro aspecto favorável à incorporação do lodo em materiais cerâmicos é o fato de que na composição da argila predomine os argilominerais e minerais não argilosos. Atualmente, vários pesquisadores estão estudando se é adequado o uso das matérias-primas, lodo de ETA e argila, em cerâmica vermelha.

Tartari et al. (2011) misturou o lodo da ETA da unidade Tamanduá, em Foz do Iguaçu - PR, em massas argilosas para confecção de cerâmica vermelha. Os resultados mostraram que a concentração de lodo a ser incorporada na massa de cerâmica vermelha, para a produção de tijolos, sem causar trincas e deformações é de no máximo 8%;

Segundo Oliveira et al. (2004), os resultados de sua pesquisa mostraram que o lodo de ETA, oriundo da região de Campos dos Goytacazes-RJ, pode ser considerado como sendo uma formulação de massa argilosa natural, rico principalmente em SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que apresentou comportamento físico-químico e mineralógico semelhante ao de algumas argilas caulínicas da região de Campos dos Goytacazes-RJ utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha, portanto, constitui-se num material adequado para ser aproveitado em cerâmicas vermelhas.

Teixeira et al. (2006) misturou argila sedimentar, usada para produzir tijolo maciço, proveniente de várzea, do município de Indiana, próximo de Presidente Prudente, com 10% do lodo que possuíam alumínio em sua composição e 20% de lodo que possuíam ferro em sua composição. Foi observado que, para a argila de Indiana, a incorporação do lodo ETA-Al

resultou em baixa resistência mecânica, menores que o valor limite de 2 MPa e que o lodo ETA-Fe, pode ser adicionado à argila nas concentrações de até 20%, para temperaturas de queima maiores que 900°C.

Paixão (2005) misturou o lodo da ETA de Brumadinho (MG) com argila proveniente de Santa Gertrudes (SP) e chegou à conclusão que é adequado aproveitá-lo em cerâmica vermelha para adições de até 10% em argila;

Silva et al. (2011) misturou o lodo da ETA Botafogo, localizada em Igarassu/PE, com massa cerâmica da Indústria Cerâmica São José, localizada em Paudalho/PE. Foram misturados lodos em massa cerâmica nas proporções de 2%, 3%, 5%, 7%, 9%, 12% e 15% e depois submetidos aos ensaios tecnológicos de Retração Linear, Tensão de Ruptura à Flexão e Absorção de Água. Os resultados mostraram que todas as porcentagens de adição de lodo na confecção de blocos cerâmicos ficaram dentro dos padrões admissíveis pelas normas pertinentes.

3.8 Argilas e materiais cerâmicos

As argilas são insumos amplamente utilizados na confecção de materiais cerâmicos. Encontram-se na natureza em grandes quantidades e possuem baixa granulometria. São aluminossilicatos compostos por alumina e sílica e contêm água quimicamente ligada. Suas impurezas mais comuns incluem compostos, geralmente óxidos, à base de bário, cálcio, sódio e potássio. A argila é uma das principais matérias-primas utilizada na obtenção de produtos cerâmicos que, por sua vez, podem ser divididos em dois grupos: cerâmicas tradicionais, nos quais estão inclusos os tijolos, telhas, ladrilhos de pisos, elementos vazados, cimento e outros e as cerâmicas avançadas que abrange peças de alto valor tecnológico, tais como as utilizadas em sistemas microeletromecânicos e em sistemas de comunicação por fibras ópticas. Quando misturadas proporcionalmente, a água e a argila formam uma massa plástica que pode facilmente ser modelada. A massa modelada, ao passar pelo processo de secagem, está apta para ser cozida em uma temperatura elevada a fim de reduzir sua porosidade e aumentar sua resistência mecânica (CALLISTER, 2008).

Devido à complexidade do material cerâmico, suas matérias primas podem ser submetidas a análises térmicas de Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), com técnicas espectrométricas tais como Fluorescência de Raios X (RFX), Difração de Raios X (XRD), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com tratamentos térmicos e ensaios tecnológicos.

3.9 Produção nacional de argila

A argila comum é a principal fonte de matéria-prima utilizada no segmento de cerâmica vermelha. Em 2012, baseado no crescimento de 1,4% da construção civil, estimou-se a produção nacional de cerâmica vermelha em aproximadamente 90 bilhões de peças. Considerando a massa média de 2,0 kg por peça, é estimado uma produção de 180 Mt de argila. O consumo médio brasileiro per capita é da ordem de 464 peças/hab. e praticamente se igual à produção da argila se igual à produção. Nesse ano, foi estimado no Nordeste a produção de 18,9 bilhões de peças cerâmicas ou 37,8 Mt de argila.

Segundo o Anuário Estatístico do Ministério de Minas e Energia, os principais polos de produção industrial de cerâmica vermelha no Brasil se organizam na forma de Arranjos Produtivos Locais (APLs), onde a capacidade produtiva das empresas pode ser melhorada por meio de uma metodologia de interação e cooperação com o governo, empresas, instituições de crédito, de ensino e de pesquisa. No Brasil existem 7400 empresas atuando no seguimento de cerâmica vermelha e existem cerca de 30 APLs estruturadas, distribuídas da seguinte maneira: 12 no Nordeste, 8 no Sudeste, 4 no Sul, 4 no Norte, e 2 no Centro Oeste (MME, 2013).

O Maranhão é um dos principais polos produtores nordestinos de cerâmica vermelha com destaque para as cidades de Itapecuru Mirim, Timon/Caxias e Imperatriz. Em 2011 chegou a produzir aproximadamente 1 960 000 000 peças (CPRM, 2011). Considerando a massa média de 2,0 kg por peça, é estimado uma produção de 3,92 Mt de argila. O Número de empresas do setor de cerâmica vermelha que atuam no Nordeste chega a 2055 e no Maranhão é de aproximadamente 210 empresas (IBGE, 2008).

3.10 Tijolos maciços

O tijolo maciço é um tipo de bloco cerâmico muito utilizado para revestir muros e fachadas. Podem ser classificados em comuns e especiais. O tijolo comum geralmente é fabricado por processos de prensagem, passando por tratamentos térmicos de secagem e de queima com o objetivo de adquirir propriedades compatíveis com o seu uso. Esse tipo de tijolo não é recomendado em fundações, devido à umidade presente no solo, que pode deteriorar o material (HAGEMANN, 2011).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 2012 a produção nacional de Blocos/Tijolos atingiu cerca de 63 bilhões de peças e no Nordeste chegou a 18,9 bilhões de peças (MME, 2013).

De acordo com as propriedades mecânicas exigidas pela ABNT NBR 7170:1983, os tijolos comuns são classificados, em A, B ou C, conforme sua resistência mecânica. A Tabela 1 mostra a resistência mínima à compressão para tijolos comuns, de acordo com a norma.

Tabela 1. NBR 7170 - Resistência mínima à compressão em tijolos comuns.

Categoria	Resistência à Compressão (MPa)
A	1,5
B	2,5
C	4,0

3.11 Normas aplicadas na fabricação de tijolos e telhas

Um produto cerâmico pode ter boa qualidade se obedecer às especificações das normas vigentes. Os blocos cerâmicos maciços, de vedação ou estrutural e telhas, quando fabricados, devem obedecer aos critérios das normas em vigor. Exemplos de algumas normas usadas na fabricação de cerâmicas vermelhas:

- a) ABNT NBR 6460:1983 - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria - Verificação da resistência à compressão;
- b) ABNT NBR 7170:1983 - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria;

- c) ABNT NBR 8041:1983 - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria - Forma e dimensões - Padronização;
- d) ABNT NBR 15270-1:2005 - Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos;
- e) ABNT NBR 15270-2:2005 - Componentes cerâmicos - Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos;
- f) ABNT NBR 15270-3:2005 - Componentes cerâmicos - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio;
- g) ABNT NBR 15310:2005 Emenda 1:2009 - Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio;
- h) ABNT NBR 15310:2009 - Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio.

3.12 Moagem e prensagem da massa cerâmica

O processo de moagem da argila objetiva a diminuição, ao máximo, do tamanho de suas partículas e a garantia de uma boa homogeneização de sua massa. O processo de moagem por via seca possui vantagens de uso relacionadas com a eliminação dos custos referentes a defloculantes e aditivos, menores custos energéticos, de manutenção e menor impacto ambiental (LOLLI, 2000). No processo de via seca as amostras, que apresentam certo teor de umidade, são secas em estufa e levadas ao moinho para obtenção de tamanhos de partículas apropriadas para a fabricação do produto cerâmico (COCCHI, 2002).

Após a moagem o pó é umedecido e granulado novamente para em seguida ser submetido à etapa de conformação por prensagem uniaxial, onde são gerados os corpos compactados verdes, detentores de características básicas e propriedades mecânicas. Esses compactados são responsáveis pelas características e propriedades do produto final queimado. A conformação para produtos de argila se dá quando misturamos os pós, a argila e a água e os moldamos para dar um formato às peças cerâmicas. As misturas secas ou semissecas são prensadas mecanicamente, a fim de obtermos resistência suficiente para manuseá-los. Basicamente, as etapas desse processo são as seguintes: início do ciclo,

enchimento do molde com pós, início da prensagem, fim da prensagem, ejeção da peça e novo ciclo de enchimento do molde.

A prensagem e a sinterização são modos econômicos de se produzir peças cerâmicas que possuem geometria simples, em geral menores que 150 mm. A prensagem de pós finos permite criar cerâmicas verdes com resistência mecânica suficiente para serem manuseadas e com formatos desejados. O processo de prensagem uniaxial pode se completar em menos de um minuto e se adequa bem à confecção de peças simples e pequenas (ASKELAND, 2008).

3.13 Tratamento Térmico

O Tratamento Térmico é o processo onde os corpos de prova são submetidos ao efeito do aumento de temperatura e é constituída basicamente pelas etapas de Secagem e de Queima. Os tratamentos térmicos feitos em altas temperaturas podem constituir um importante fator na fabricação de produtos cerâmicos, pois podem alterar as propriedades do peso e do volume do material em estudo, reduzindo a porosidade e a área específica do material.

Na etapa de Secagem o excesso de umidade é removido do material ocorrendo mudanças dimensionais no mesmo. A água existente entre as partículas de argila é evaporada causando a maior parte de retração volumétrica. Pequenas mudanças dimensionais ocorrem devido à evaporação da água contida nos poros. É necessário um rigoroso controle de temperatura e umidade para obtermos a secagem uniforme de todas as peças cerâmicas, minimizando assim a ocorrência de trincas, tensões e distorções.

A Queima é o processo de aquecimento dado a um corpo cerâmico a altas temperaturas para promover a união cerâmica. No Processo de Queima, geralmente feito em um forno, ocorre a eliminação da água de hidratação da caulinita e início da fase de vitrificação, na qual é proporcionada a união cerâmica e, geralmente, acompanhada de uma retração adicional das peças. Na etapa de Queima são obtidas a resistência mecânica e a rigidez da peça cerâmica (ASKELAND, 2008).

3.14 Ensaio tecnológicos

Os corpos de prova foram confeccionados com argila sem o lodo e com a mistura de argila e lodo, todos secos a 110°C, porém, queimados apenas a 950°C durante três horas e depois investigadas as seguintes propriedades tecnológicas: Tensão de Ruptura à Flexão, Perda ao Fogo, Retração Linear de Queima, Absorção de Água, Porosidade aparente e Massa Específica Aparente.

A determinação da Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) após o processo de Queima consiste em analisar a resistência mecânica dos corpos de prova.

A Perda ao Fogo (PF) ou a variação de massa após a queima de um material está atribuída à sua matéria orgânica e a substâncias voláteis desse material. A PF é atribuída principalmente à combustão de matéria orgânica.

A Retração Linear de Queima (RLQ) é um ensaio tecnológico que consiste em analisar a contração linear de corpos de prova após o processo de sinterização (queima). Quando ocorre a sinterização do material cerâmico há uma redução de volume, relacionada à perda da água de constituição e à redução ou eliminação dos seus poros (SOUZA SANTOS, 1989). Provavelmente, essa redução é consequência das reações físicas e químicas das argilas quando submetidas à ação de altas temperaturas.

A determinação de Absorção de Água (AA) consiste em analisar qual o percentual de absorção de água dos corpos de prova. Nos corpos cerâmicos, a absorção de água está diretamente relacionada com a porosidade, ou seja, quanto maior a porosidade de um corpo maior será a absorção de água. É um parâmetro que pode ser utilizado para medir a porosidade aberta e avaliar a fundência do material. A porcentagem de água absorvida pelos corpos de prova, suas massas úmidas ou saturadas, pode ser obtida pelo Método de Arquimedes. De posse da medida da massa úmida e da massa seca após a queima é possível calcular a Absorção de Água para cada corpo de prova. Neste trabalho denominaremos a massa seca após a sinterização (queima) de Massa de queima (M_q).

A Porosidade Aparente (PA) representa a porcentagem do volume dos poros abertos do corpo de prova em relação ao seu volume aparente ou total (volume ocupado pelas partículas e pelos poros).

Massa Específica Aparente (MEA), dada em g/cm^3 , é definida como a relação entre a massa de um corpo de prova queimado e o seu volume aparente e consiste em analisar qual a densidade dos corpos de prova (NEVILLE, 2010).

3.15 Caracterizações térmicas das amostras

As amostras de lodo podem ser caracterizadas por Análise Termogravimétrica (TG) e Análise Térmica Diferencial (DTA). Nessas técnicas, propriedades de uma amostra podem ser medidas em função da temperatura. Para realizar essas análises são necessários poucos miligramas da amostra, que serão submetidas a uma programação de temperatura numa atmosfera específica.

A técnica de DTA é capaz de caracterizar os processos físicos e químicos, relacionados com efeitos térmicos na amostra, acusando transformações endotérmicas e exotérmicas. Assim, de posse das variações de massa da amostra e de suas variações da temperatura, é possível fazer uma avaliação sobre sua constituição e estrutura (NEUMANN, 2004). A TG é uma técnica onde é possível acompanhar as variações de massas da amostra durante um intervalo de tempo, enquanto sua temperatura pode ser variada. Geralmente, a temperatura é aumentada a uma velocidade constante. Na técnica de DSC é possível acompanhar as transições de fase ou reações químicas ocorridas por meio da observação do calor absorvido ou libertado. Essa técnica é adaptada aos estudos de transformações das estruturas internas de um sólido, quando o mesmo é submetido à temperaturas elevadas e pode revelar variações em energia independentemente da variação ou da constância de massa da amostra (EWING, 2006).

3.16 Técnicas espectrométricas

Para caracterizar o lodo e a argila, foram usadas as técnicas de Fluorescência de Raios X (XRF), Difração de Raios X (XRD) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.16.1 Fluorescência de Raios X

Os elétrons, ao serem excitados por uma radiação invisível curta, elevam-se de seus estados básicos para níveis de energia mais altos e tendem a cair de volta ao seu estado inicial de energia mais baixa. Quando isso acontece, é emitida uma luz visível de mesmo comprimento de onda. Porém, esses elétrons excitados podem cair de volta para um nível de energia intermediário entre o estado excitado e o estado fundamental. Quando isso ocorre, eles emitem fótons de luz de energia mais baixa (comprimento de onda mais longo) por um intervalo de tempo da ordem de 10^{-8} segundos. Os minerais variam em sua capacidade de absorver a radiação ultravioleta a um dado comprimento de onda. Eles podem mostrar a fluorescência em um comprimento de onda UV curto, ou em um comprimento de onda UV longo ou em qualquer comprimento de onda UV. A técnica de Fluorescência de Raios X consiste, basicamente, na emissão de raios X que excitam os átomos de uma amostra e produzem uma radiação característica de seus níveis de energia, que correspondem às suas camadas eletrônicas mais internas. Assim, podemos saber sobre seus comprimentos de ondas, que são característicos do elemento que as produz (KLEIN, 2012).

Quando fótons de raios X são usados para excitar os átomos de uma amostra, provocando transições eletrônicas nesses, a técnica é chamada de análise de Fluorescência de Raios X (XRF). Nessa análise os espectros podem ser medidos por meio da Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF) e da Fluorescência de Raios X por Dispersão de Comprimento de Onda (WD-XRF). Na técnica ED-XRF, os raios X característicos podem ser separados por meio da medida e identificação de suas energias e na técnica WD-XRF, os raios X característicos podem ser separados por meio de seus comprimentos de onda (IAEA, 1999). Nesse trabalho as amostras foram analisadas por meio da Fluorescência de Raios X por Dispersão de Comprimento de Onda.

3.16.2 Difração de Raios X

Os raios X são ondas eletromagnéticas, ou seja, são acompanhadas por um campo elétrico em flutuação periódica. Uma vez que um elétron de um átomo fique influenciado

pelos raios X, o mesmo é excitado pelo campo elétrico flutuante, tornando-se também uma fonte de ondas eletromagnéticas de mesma frequência e comprimento de onda que os raios X incidentes. Quando um plano de átomos é atingido por um feixe de raios X, ocorre a difração desse feixe. Esse fenômeno ocorre segundo a Lei de Bragg, a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram, característicos para cada fase cristalina. A técnica de Difração de Raios X com uso mais frequente é o método dos pó, onde é utilizada uma amostra em pó para que exista uma orientação aleatória de um considerado número de cristais, assegurando que algumas partículas estejam orientadas em relação ao feixe de raios X, a fim de satisfazer as condições de difração da lei de Bragg (SMITH, 2010).

Na técnica de Difração de raios X é usado um instrumento chamado de difratômetro, no qual é gerado um feixe de raios X que tem como finalidade incidir sobre a amostra em estudo. A amostra, por sua vez, difrata os raios X gerando um registro gráfico chamado de difratograma. A interpretação adequada das fases contidas no difratograma dará como resultado a identificação das fases cristalinas presentes na amostra. Isso pode ser realizado com o auxílio de softwares de tratamento de dados do International Center for Diffraction Data (ICDD). Trata-se, portanto, de uma técnica muito confiável na identificação das fases cristalinas de uma determinada amostra (NEUMANN, 2004).

Nas análises em amostras usando a técnica de Difração de Raios X juntamente com a Fluorescência de Raios X, pode-se obter informações suficientes para determinar a composição química e mineralógica das fases presentes na argila.

3.16.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Devido ao fato de os elétrons serem um tipo de radiação ionizante, sua interação com as amostras a serem analisadas produz uma série de sinais, tais como elétrons secundários, retroespalhados, Auger, raios X e luz visível. Muitos desses sinais são úteis na técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura, o que nos permite obter detalhes mais nítidos sobre a morfologia das amostras bem como suas informações químicas qualitativas e quantitativas. O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) usa um feixe de 2 a 3 nm de

elétrons que varrem a superfície da amostra, onde são gerados elétrons secundários para serem detectados por um sensor e processados e, eventualmente, traduzidos como uma série de pixel em um monitor. Ao final, o MEV nos apresenta uma aparência tridimensional da imagem da amostra em estudo.

Na técnica de MEV os elétrons secundários, de baixa energia, marcam a posição do feixe e geram informações topográficas, precisas e de boa resolução; Os elétrons retroespalhados, de alta energia, nos dão informações relacionadas com a topografia e composição da amostra analisada; Os elétrons do tipo Auger, de baixa energia, carregam informação sobre a natureza química da amostra. Portanto, a técnica MEV de caracterização microestrutural, aplicada em diversos ramos da ciência, pode nos trazer informações sobre a morfologia de amostras sólidas com alto poder de resolução, com imagens com grande profundidade de foco, com características microestruturais, com a identificação dos elementos químicos da amostra e nos proporcionar uma aparência tridimensional da imagem gerada (DURÁN, 2006).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritos os materiais e as metodologias que foram empregadas para a realização do presente trabalho. O diagrama da Figura 2 descreve a sequência experimental da pesquisa.

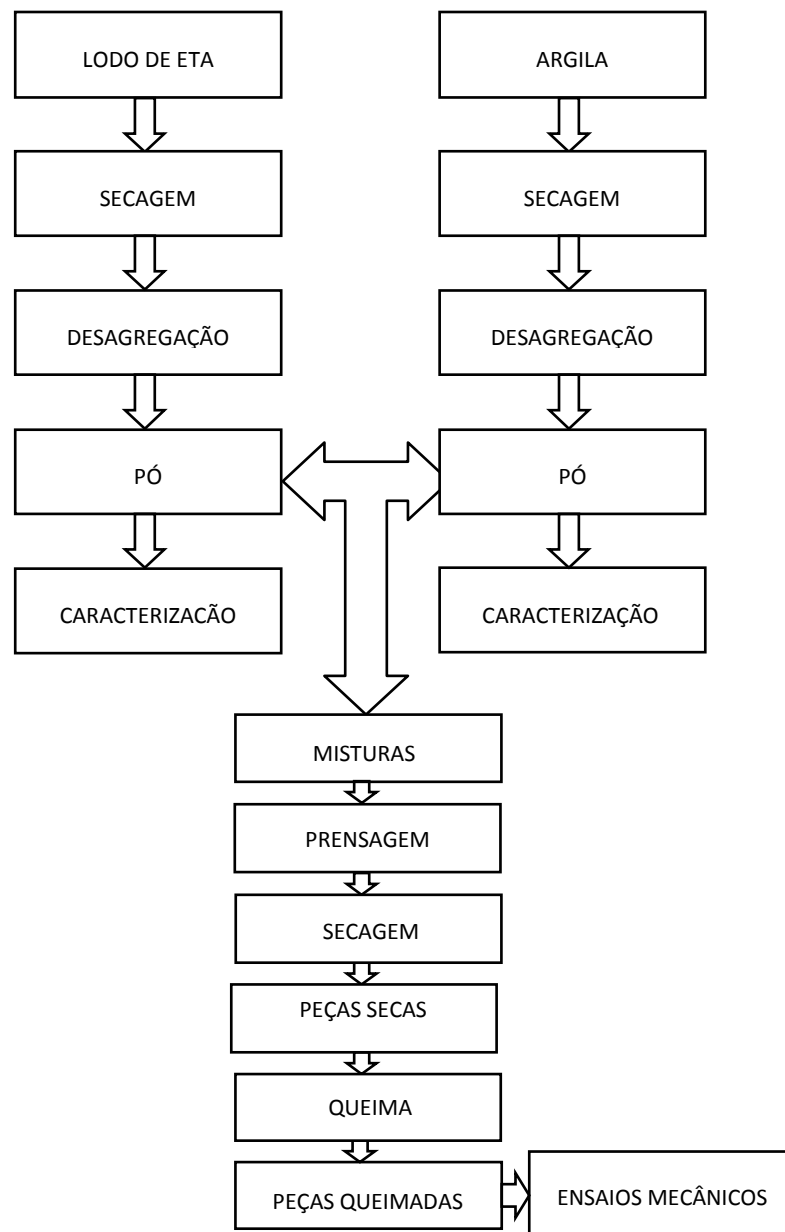


Figura 2. Diagrama de blocos com a sequência experimental da pesquisa.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente, as amostras da argila e do lodo foram submetidas a um tratamento de secagem a 70°C por 24h a fim de eliminar a água e depois acondicionadas, cada uma, em

sacos de polietileno. Após esse processo, foram separadas e moídas as amostras de cada resíduo e utilizadas peneiras da série Tyler de número 60. Foram separados alguns mg do pó da argila e do lodo para a realização das caracterizações espectrométricas de Fluorescência de Raios X (XRF), Difração de Raios X (XRD) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram realizadas as seguintes caracterizações térmicas: Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Análise Termogravimétrica (TG) e Análise Térmica Diferencial (DTA).

Foram preparadas e compactadas as massas de argila pura com o objetivo de originar os referentes corpos de prova com argila pura. O mesmo procedimento foi realizado para a argila incorporada com lodo nas seguintes percentagens: 5, 10, 15, 20 e 25%. Após a compactação e depois de codificados, enumerados, medidos suas massas verdes em balança analítica e suas dimensões por meio de um paquímetro digital e tabelados esses dados, os corpos de prova foram levados à secagem em estufa ventilada a 110°C por 24 horas.

Após a secagem, foram colocados em dessecador até estabilizar a temperatura e evitar a absorção de umidade do ambiente. Depois medidas as massas secas dos corpos de prova em balança analítica, bem como suas dimensões por meio de um paquímetro digital e tabelados esses dados.

O Processo de Queima dos corpos de prova foi realizado em forno elétrico em atmosfera oxidante nas temperaturas de 110°C a 950°C.

A velocidade de aquecimento programada para a primeira etapa foi de 2°C/min, até um patamar de 110°C por 1 hora. Para a segunda etapa foi de 5°C/min, até um patamar de 550°C por 1 hora. Após este patamar, manteve-se a velocidade de aquecimento em 5°C/min até um patamar de 950°C por 3 horas. A refrigeração dos corpos de prova ocorreu por convecção natural dentro do forno após o término do ciclo. Após isso, as peças queimadas foram colocadas em dessecador com sílica gel. Depois foram medidas suas massas queimadas em balança analítica, suas dimensões por meio de um paquímetro digital e tabelados esses dados.

Após o processo de Queima, foram investigadas as seguintes propriedades tecnológicas: Retração Linear de Queima, Tensão de Ruptura à Flexão, Absorção de Água, Porosidade aparente, Massa Específica Aparente e Perda ao Fogo.

4.1 Obtenções das matérias-primas

As amostras de lodo e argila (Figura 3) deste trabalho foram cedidas pelo Laboratório de Processamento Cerâmico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, já submetidas a um processo prévio e inicial de secagem, para eliminação de água, e acondicionadas em sacos de polietileno.



Figura 3. Amostra de lodo usada neste trabalho (A). Argila tratada usada neste trabalho (B).

A argila bruta foi colhida pelos pesquisadores do IFMA no município de Imperatriz, no estado do Maranhão.

O lodo bruto foi colhido nos decantadores da ETA do Sacavém, em São Luís-MA, e também acondicionado em sacos de polietileno.

A ETA do Sacavém é do tipo convencional, onde são realizadas as etapas de correção do pH, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação.

4.2 Caracterizações das amostras de lodo e argila

Para a realização das caracterizações, a seguir, as amostras em pó do lodo e da argila, separadamente, foram peneiradas em 60 mesh e depois passaram pelo processo de secagem em estufa a 70°C por 24 h.

4.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios - X

A composição elementar das amostras de lodo e da argila foi determinada num Espectrofotômetro de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Comprimento de Onda da Bruker, modelo S8 Tiger, utilizando fonte de radiação de Ródio (Rh), potência geradora de 30 kV, corrente do tubo 33mA, colimador 0,23 graus, cristal XS-55, detector selado, LLD 1,0 ppm, filmes Myler® (3,6 µm), recipientes de teflon e diâmetro da máscara 34mm.

4.2.2 Difractometria de Raios X

A determinação qualitativa de estruturas cristalinas das amostras do lodo e da argila foi realizada em um difratômetro de Raios-X Bruker, modelo D8 Advance, utilizando radiação monocromática de Cu, tensão de 40kV, corrente de 20mA, varredura com passo de 0,02°, detector linear, razão de contagem por passo de 1s e calibrado em 2θ com padrão de silício. As fases cristalinas presentes no difratograma foram identificadas pela comparação com padrões difratométricos de minerais do banco de dados do International Center for Diffraction Data – ICDD e os resultados obtidos foram analisados por meio do software Xpert High Score Plus com base de dados JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

As micrografias eletrônicas dos pós de lodo e de argila foram obtidas em um equipamento MEV. O microscópio utilizado foi um modelo da FEI Inspect F50 com canhão Schottky Field Emission Gun (FEG). Usando um porta-amostra com redução de carga.

4.3 Análise térmica do lodo

A análise térmica do pó do lodo foi realizada em equipamento Analisador térmico simultâneo TG/DTA SHIMADZU, modelo STA-409, sob fluxo de nitrogênio, de 29°C até 1350°C com uma taxa de aquecimento de 15°C por minuto.

4.4 Procedimentos para os ensaios tecnológicos após a Queima

Após a Queima dos corpos de prova foram realizados os seguintes ensaios: Tensão de Ruptura à Flexão, Retração Linear após Queima, Absorção de Água, Porosidade Aparente, Massa Específica Aparente e Variação da Massa após Queima ou Perda ao Fogo.

4.4.1 Tensão de Ruptura à Flexão

Para realizar essa resistência foi feita a análise da força flexão de ruptura em três pontos. Este ensaio foi realizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA, no Laboratório de Ensaio Mecânicos, em uma máquina de ensaio mecânico universal Emic DL30000N, de acordo com a norma ASTM C674-88 (ASTM, 1999). De acordo com essa norma o valor da Tensão de Ruptura à Flexão, após a sinterização, pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$TRF = \frac{3.P.L}{2.b.h^2}, \quad (1)$$

em que, TRF é a tensão de ruptura à flexão (MPa), P é a carga máxima em Newtons (N) atingida no momento da ruptura, L é a distância entre os apoios (mm), h é a altura ou espessura do corpo de prova (mm) e b é a largura do corpo de prova (mm) (ASKELAND, 2008).

Os corpos de prova foram ensaiados à flexão, biapoiados, com aplicação de uma carga concentrada no ponto médio do vão livre, conforme mostrado na Figura 13, com uma velocidade equivalente a 0,8 mm/min.

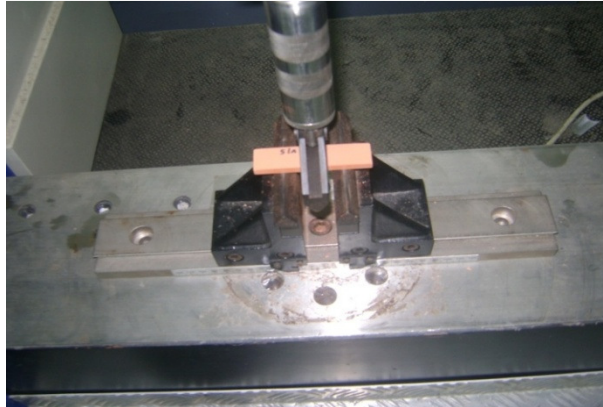


Figura 4. Corpo de prova submetido à força flexão de ruptura em três pontos.

4.4.2 Retração Linear após Queima

A Retração Linear de Queima foi obtida através do comprimento (inicial) do corpo de prova, após o processo de secagem, e o comprimento (final), após o processo de queima, sendo estas medidas obtidas por meio de um paquímetro. Esse ensaio foi realizado de acordo com ASTM C210-95 (ASTM, 1999). De acordo com essa norma o valor da Retração Linear de Queima, após o processo de Queima, pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$RLQ = \frac{L_s - L_q}{L_s} \cdot 100, \quad (2)$$

em que, L_s é o comprimento do corpo de prova após o mesmo ser submetido ao processo de secagem na estufa e L_q é o comprimento do corpo de prova após o mesmo ser submetido ao processo de Queima.

4.4.3 Absorção de Água

A Absorção de Água foi determinada de acordo com o procedimento padrão, descrito na ABNT NBR 15270-3:2005. Antes do ensaio de absorção de água foram feitas as medições das massas de queima, em gramas, de todos os corpos de prova e os mesmos mantidos a 110°C por 24 horas. Depois, foram separados 31 corpos de prova para o ensaio em questão.

Num recipiente metálico foi adicionado água até a metade do seu volume e levado para uma chapa aquecedora. No momento da ebulição da água os corpos de prova ficaram submersos por 5 horas, tempo suficiente para que a água penetre nos poros abertos formados durante a queima dos corpos. Após esse intervalo de tempo a chapa foi desligada, o aquecimento foi interrompido e os corpos deixados resfriar nesse meio até temperatura ambiente, permanecendo em banho no recipiente por 24 horas.

Pelo método de Arquimedes determinou-se a porcentagem de água absorvida pelo corpo cerâmico, sua porosidade aparente e massa específica aparente. A massa de cada corpo de prova imerso foi determinada suspendendo-o com um fio preso à balança. Em seguida, os corpos de prova foram retirados do recipiente, eliminando o excesso de água com papel absorvente e, então, medidas suas massas saturadas ou úmidas.

Os dados dessa medida mostram a variação da massa devido à absorção de água pelos poros abertos formados durante a queima dos corpos de prova. A porcentagem de absorção de água pode ser calculada pela seguinte equação (NBR 15270-3, 2005):

$$AA = \frac{(M_u - M_q)}{M_q} \cdot 100, \quad (3)$$

em que, AA é a Absorção de Água dada em porcentagem, M_u é a massa, em gramas do corpo de prova saturado ou úmido em água e M_q é a massa, em gramas, do corpo após a queima.

4.4.4 Porosidade Aparente e Massa Específica Aparente

Para a Porosidade Aparente dos corpos de prova foi utilizado o método de ensaio da norma ASTM C373-88 (ASTM, 2006), de acordo com a equação:

$$PA = \frac{M_u - M_q}{M_u - M_i} \cdot 100, \quad (4)$$

em que, PA é a porosidade aparente dada em porcentagem, M_u é a massa (g) do corpo de prova saturado ou úmido em água, M_q é a massa (g) do corpo após a queima e M_i é a massa do corpo imerso em água, medido pelo método da balança hidrostática.

A Massa Específica Aparente dos corpos de prova foi determinada também de acordo com a norma ASTM C373-88 (ASTM, 2006). Os corpos cerâmicos após imersão em um recipiente com água destilada por um período de 24 horas foram submetidos a medições em suas massas úmidas e depois em suas massas imersas em água pelo método da balança hidrostática de Arquimedes. Segundo a norma ASTM C373-88 a Massa Específica Aparente pode ser obtida por meio da equação:

$$MEA = \frac{M_q}{M_u - M_i} \cdot \alpha_a, \quad (5)$$

em que, M_q é a massa (g) do corpos de prova após a queima, M_u é a massa (g) do corpo de prova saturado ou úmido, M_i é a massa (g) do corpo imerso em água, medido pelo método da balança hidrostática e α_a é a massa específica da água (1g/cm^3).

4.4.5 Perda ao Fogo

A porcentagem de Perda ao Fogo (PF) dos corpos de prova foi determinada com o auxílio de um forno mufla. Após o aquecimento dos corpos em até 950°C , a variação de massa dos corpos pode ser calculada pela seguinte expressão (COCCHI, 2002):

$$PF = \frac{M_s - M_q}{M_s} \cdot 100, \quad (6)$$

em que, M_s é a massa (g) do corpo de prova após o mesmo ser submetido ao processo de secagem a 110°C na estufa e M_q é a massa (g) do corpo após ser submetido ao processo de queima em até 950°C .

Os dados de todas as equações supracitadas nesta seção foram utilizados para preencher as tabela 7 até a Tabela 18 que se encontram registradas no anexo.

4.5 Ensaios tecnológicos realizados nos corpos de prova

4.5.1 Ensaio tecnológico de TRF

Após os 62 corpos de prova ser submetidos a tratamento térmico de até 950°C, em forno mufla por 24 horas, foram separadas 31 peças para a realização dos ensaios de TRF.

Foram realizados os ensaios de TRF nas seguintes peças:

- a) 4 corpos de prova (1A, 2A, 3A e 4A) de argila pura;
- b) 5 corpos de prova (1LA5%, 2LA5%, 3LA5%, 4LA5% e 5LA5%) com 5% de lodo;
- c) 6 corpos de prova (1LA10%, 2LA10%, 3LA10%, 4LA10%, 5LA10% e 6LA10%) com 10% de lodo;
- d) 6 corpos de prova (1LA15%, 2LA15%, 3LA15%, 4LA15%, 6LA15% e 7LA15%) com 15% de lodo;
- e) 5 corpos de prova (2LA20%, 3LA20%, 4LA20%, 5LA20% e 6LA20%) com 20% de lodo;
- f) 5 corpos de prova (1LA25%, 2LA25%, 3LA25%, 4LA25% e 5LA25%) com 25% de lodo.

Os ensaios realizados nos 31 corpos de prova estão descrito na Tabela 3.

Tabela 2. Ensaios tecnológicos de TRF realizados em 31 corpos de prova.

ENSAIO TECNOLÓGICO DE TRF						
	ARGILA PURA	5% LODO	10% LODO	15% LODO	20% LODO	25% LODO
P E Ç A S	1A	1LA5%	1LA10%	1LA15%	2LA20%	1LA25%
	2A	2LA5%	2LA10%	2LA15%	3LA20%	2LA25%
	3A	3LA5%	3LA10%	3LA15%	4LA20%	3LA25%
	4A	4LA5%	4LA10%	4LA15%	5LA20%	4LA25%
	-	5LA5%	5LA10%	6LA15%	6LA20%	5LA25%
	-	-	6LA10%	7LA15%	-	-
Qda.*	4	5	6	6	5	5
Total	31					

*Quantidade

A maioria das peças foi quebrada em duas partes, outras poucas em três partes e em algumas delas não ficou muito visível à ruptura. A Figura 14 mostra os corpos de prova após o ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão.

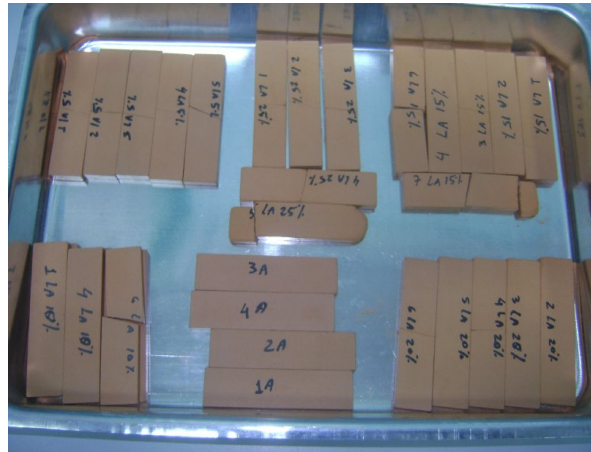


Figura 5. Corpos de prova após o ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão.

4.5.2 Ensaios tecnológicos realizados com a Balança de Arquimedes

Os demais 31 corpos de prova, não submetidos à quebra, foram separados para a realização dos ensaios de AA, MEA e PA, os quais requerem a Balança de Arquimedes.

Foram realizados os ensaios de AA, MEA e PA nas seguintes peças:

- a) 4 corpos de prova (5A, 6A, 7A e 8A) de argila pura;
- b) 5 corpos de prova (6LA5%, 7LA5%, 8LA5%, 9LA5% e 11LA5%) com 5% de lodo;
- c) 6 corpos de prova (7LA10%, 8LA10%, 9LA10%, 10LA10%, 11LA10% e 12LA10%) com 10% de lodo;
- d) 6 corpos de prova (8LA15%, 9LA15%, 10LA15%, 11LA15%, 12LA15% e 13LA15%) com 15% de lodo;
- e) 5 corpos de prova (7LA20%, 8LA20%, 9LA20%, 10LA20% e 11LA20%) com 20% de lodo;
- f) 5 corpos de prova (6LA25%, 7LA25%, 8LA25%, 9LA25% e 10LA25%) com 25% de lodo.

Os ensaios realizados nos 31 corpos de prova estão descrito na Tabela 4.

Tabela 3. Ensaio tecnológicos de AA, MEA, PA realizados em 31 corpos de prova.

		ENSAIOS TECNOLÓGICOS					
		ARGILA PURA	5% LODO	10% LODO	15% LODO	20% LODO	25% LODO
P E Ç A S	5A	6LA5%	7LA10%	8LA15%	7LA20%	6LA25%	
	6A	7LA5%	8LA10%	9LA15%	8LA20%	7LA25%	
	7A	8LA5%	9LA10%	10LA15%	9LA20%	8LA25%	
	8A	9LA5%	10LA10%	11LA15%	10LA20%	9LA25%	
	-	11LA5%	11LA10%	12LA15%	11LA20%	10LA25%	
	-	-	12LA10%	13LA15%	-	-	
Qda.*	4	5	6	6	5	5	
Total	31						

*Quantidade

Após esse ensaio todas as peças ficaram dotadas de umidade e foram guardadas em recipiente plástico. A Figura 15 mostra alguns corpos de prova após os ensaios tecnológicos obtidos com a Balança de Arquimedes.



Figura 6. Corpos de prova após o ensaio da Balança Hidrostática.

4.5.3 Ensaio tecnológicos de RLQ e PF

Todos os corpos de prova, antes de passarem pelo ensaio de TRF e dos ensaios obtidos usando a Balança de Arquimedes, foram submetidos aos ensaios de RLQ e PF.

Foram realizados os ensaios de RLQ e PF nas seguintes peças:

- a) 8 corpos de prova (1A, 2A, 3A, 4A, 5A, 6A, 7A e 8A) de argila pura;

b) 10 corpos de prova (1LA5%, 2LA5%, 3LA5%, 4LA5%, 5LA5%, 6LA5%, 7LA5%, 8LA5%, 9LA5%, 11LA5%) com 5% de lodo;

c) 12 corpos de prova (1LA10%, 2LA10%, 3LA10%, 4LA10%, 5LA10%, 6LA10%, 7LA10%, 8LA10%, 9LA10%, 10LA10%, 11LA10% e 12LA10%) com 10% de lodo;

d) 12 corpos de prova (1LA15%, 2LA15%, 3LA15%, 4LA15%, 6LA15%, 7LA15%, 8LA15%, 9LA15%, 10LA15%, 11LA15%, 12LA15% e 13LA15%) com 15% de lodo;

e) 10 corpos de prova (2LA20%, 3LA20%, 4LA20%, 5LA20%, 6LA20%, 7LA20%, 8LA20%, 9LA20%, 10LA20% e 11LA20%) com 20% de lodo;

f) 10 corpos de prova (1LA25%, 2LA25%, 3LA25%, 4LA25%, 5LA25%, 6LA25%, 7LA25%, 8LA25%, 9LA25% e 10LA25%) com 25% de lodo.

Os ensaios realizados nos 62 corpos de prova estão descritos na Tabela 5.

Tabela 4. Ensaios tecnológicos de RLQ e PF realizados em 62 corpos de prova.

ENSAIOS TECNOLÓGICOS						
	ARGILA PURA	5% LODO	10% LODO	15% LODO	20% LODO	25% LODO
P E Ç A S	1A	1LA5%	1LA10%	1LA15%	2LA20%	1LA25%
	2A	2LA5%	2LA10%	2LA15%	3LA20%	2LA25%
	3A	3LA5%	3LA10%	3LA15%	4LA20%	3LA25%
	4A	4LA5%	4LA10%	4LA15%	5LA20%	4LA25%
	5A	5LA5%	5LA10%	6LA15%	6LA20%	5LA25%
	6A	6LA5%	6LA10%	7LA15%	7LA20%	6LA25%
	7A	7LA5%	7LA10%	8LA15%	8LA20%	7LA25%
	8A	8LA5%	8LA10%	9LA15%	9LA20%	8LA25%
	-	9LA5%	9LA10%	10LA15%	10LA20%	9LA25%
	-	11LA5%	10LA10%	11LA15%	11LA20%	10LA25%
	-	-	11LA10%	12LA15%	-	-
	-	-	12LA10%	13LA15%	-	-
Qd.*	8	10	12	12	10	10
Total	62					

*Quantidade

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Preparação da amostra de argila

5.1.1 Processo de Moagem

Foram moídas aproximadamente 1500g de argila, quantidade suficiente para a realização dos ensaios tecnológicos desse trabalho. Em laboratório, com o auxílio da espátula, foi transferida da amostra bruta de argila a primeira porção para um Becker de 200 ml, em seguida para uma cuba de alumina, conforme mostrado na Figura 4. Ainda com o auxílio da espátula, almofariz e pistilo, foi feito o destorroamento da primeira porção de argila, na própria cuba, homogeneizando-a.



Figura 7. Porção de argila na cuba de alumina.

Depois de homogeneizada, a primeira porção seguiu para o moinho almofariz/pistilo para ser realizado o processo de moagem, permanecendo por cerca de 10 minutos. O moinho utilizado possui uma cuba e pistilo em cerâmica de alumina, com diâmetro de 70 mm e altura 50 mm. A cada moagem das porções no moinho, as mesmas foram acomodadas em um recipiente plástico e, mesmo com as porções passando pelo processo de moagem, observavam-se alguns poucos torrões, porém, com o auxílio da espátula e pistilo do almofariz, eram destorroados e homogeneizados. Após totalizarem cerca de 8 porções de 200 mL de argila, as mesmas foram levadas para a balança analítica, onde foi medida uma massa de 1497,13g de argila moída.

5.1.2 Processo de Peneiramento

Nessa etapa foi peneirada toda a argila moída. A massa de argila ficou mantida em estufa por 24h a 70°C. Após sua retirada da estufa foram executados os seguintes procedimentos: com o auxílio da espátula, foram transferidas algumas porções da argila para uma peneira #60 (abertura de 0,250mm) e, com o auxílio de um pincel, foi acelerado o processo de peneiração com a execução de movimentos circulares e lineares, conforme Figura 5. As partes peneiradas, que ficaram na peneira de fundo foram postas em recipiente plástico até totalizarem, a princípio, apenas uma massa de 250g de argila seca. Foi efetuado o mesmo procedimento de peneiramento, descrito acima, para o restante (1247,13g) da argila de maneira que a parte peneirada, que ficou na peneira de fundo, foi acomodada de volta ao saco plástico para ser usada posteriormente em adição com quantidades estipuladas de lodo.



Figura 8. Processo em peneira com 0,250 mm de abertura.

5.1.3 Preparação da argila pura para a confecção dos corpos de prova

Nessa etapa foram preparadas as massas de argila que darão origem a nove corpos de prova sem adição de lodo. De acordo com Souza Santos (1989), a umidade de prensagem pode ser acertada por tentativa até se obter um corpo de prova que possa ser extraído facilmente do molde e manuseável sem esfarelar e está, geralmente, na faixa de 5% a 10%.

Foi utilizado 8% m/m de umidade. Portanto, foram calculados 8% em cima dos 250g da argila seca, resultando 20g, equivalente de massa de água necessário para umidificar a porção de argila seca. Os 20g de água foram depositados lenta e cuidadosamente em cima dos 250g de argila, localizados no prato da balança analítica. A massa da argila e água (270g) foi transferida, dentro de um recipiente, para a bancada e, a seguir, foi submetida manualmente a processo de homogeneização, conforme Figura 6, por 30 minutos.



Figura 9. Processo de homogeneização manual da água na argila.

Após o processo de homogeneização manual da água na argila, a mesma foi submetida a outro processo de peneiramento com o auxílio de crivo e vasilhas de plásticos, a fim de ajudar no processo de homogeneização. As sobras de grãos, que não passavam na peneira plástica, foram colocadas no almofariz, a fim de serem apiloadas e, assim, serem recolocadas de volta no crivo até que todos os grãos fossem peneirados. Esse processo foi repetido por três vezes e ocasionou a perda de pequeníssimas quantidades de massas.

Foi medida a massa de 24 g do produto final e inserida em um copo plástico de 50 mL. Foi feito o mesmo procedimento para 9 copos, cada um com 24g. Os copos foram guardados em dessecadores com sílica gel. As massas de cada copo são as que darão origem aos corpos de prova (barrinhas de argila), por meio da prensa mecânica. As pequenas porções de argila que ficaram retidas e inúteis foram embaladas em outro saco plástico.

5.2 Preparação da amostra do lodo de ETA

5.2.1 Processo de moagem e peneiramento do lodo

O procedimento descrito no processo de moagem da argila foi, praticamente, o mesmo empregado no processo de moagem do lodo. Com o auxílio da espátula, foi transferida da amostra geral do lodo uma primeira porção de aproximadamente 177 mL para um Becker de 200 mL, em seguida para uma bacia recipiente onde, com o auxílio de uma peça metálica, foi fragmentada por destorroamento. Depois de destorroada a primeira porção do lodo, com o auxílio da espátula e do pistilo, a mesma foi transferida para a cuba em cerâmica. O espaço descontínuo na porção, conforme mostra a Figura 7, foi deixado a fim de ajudar no posicionamento do pistilo no moinho.



Figura 10. Porção de lodo no processo de moagem.

A primeira porção na cuba seguiu para o moinho almofariz/pistilo motorizado por 10 minutos. Cada porção que voltava do moinho almofariz/pistilo ficava acomodada em um recipiente onde, os poucos e pequenos torrões que retornavam, eram destorroados e homogeneizados com o auxílio da espátula.

Após totalizarem cinco porções de cerca de aproximadamente 177 mL de lodo, as mesmas foram levadas para a balança analítica, a fim de serem medidas suas massas. Todas as porções totalizaram uma massa de 883,69g, o suficiente para a nossa pesquisa. Após a pesagem a porção do lodo não foi beneficiada com secagem em Estufa, pois a mesma já

estava conservada seca, porém, foi submetida ao mesmo procedimento de peneiramento da argila de maneira que, os grãos retidos e inúteis foram embalados em saco plástico e a parte peneirada do lodo, que ficou na peneira de fundo, foi acomodada também em saco plástico para ser usada posteriormente.

5.3 Misturas de lodo na argila

Foi estabelecido que a mistura de 5% de lodo na argila gerasse 11 corpos de prova. Com o lodo e a argila preparados foi realizada a medição da massa de 250g de argila e de 12,5g de lodo (5% m/m). A mistura foi homogeneizada com o auxílio de uma espátula e submetida a processo de peneiramento, a fim de ajudar no processo de homogeneização.

Para umidificar a mistura do lodo com a argila foi adicionada 8% m/m (21g) de água destilada. A água foi adicionada lenta e cuidadosamente sobre os 262,5g da mistura, localizados no prato da balança analítica. A mistura umedecida foi transferida, usando-se um recipiente plástico, para a bancada e submetida manualmente a processo de homogeneização por 30 minutos.

A mistura úmida foi submetida, novamente, a processo de peneiramento. As sobras que não passaram no crivo foram colocadas no almofariz, a fim de serem apiloadas para depois serem recolocadas no crivo até que todos os grãos fossem peneirados. Esse processo foi repetido por três vezes.

Foi medida a massa de 24g do produto final e inserida em um copo plástico de 50 mL. O mesmo procedimento foi realizado para 11 copos, cada um com 24g e foram armazenados em dessecadores.

O mesmo procedimento foi aplicado para mistura de lodo em 250g de argila nas respectivas porcentagens: 10, 15 e 20%. Já para a mistura de lodo em 25% foi utilizado uma quantidade de 180g de argila. A seguir tem-se a quantidade de lodo e de água para umidificação e homogeneização das matérias primas para as respectivas misturas:

a) Com 10% de lodo na argila foram obtidos 25g de lodo e 22g de água para umidificar a mistura, com o objetivo de gerar 12 corpos de prova.

- b) Com 15% de lodo na argila foram obtido 37,5g de lodo e 23g de água para umidificar a mistura, a fim de gerar 13 corpos de prova.
- c) Com 20% de lodo na argila foram obtidos 42g de lodo e 20,16g de água para umidificar a mistura, a fim de gerar 11 corpos de prova.
- d) Com 25% de lodo na argila foram obtidos 45g de lodo e 18g de água para umidificar a mistura, com o objetivo de gerar 10 corpos de prova.

5.4 Preparação dos corpos de prova

5.4.1 Preparação dos corpos de prova de argila pura

Segundo Souza Santos (1989), os corpos de prova podem ser moldados, formados e conformados por vários métodos de uso em cerâmica, porém, o único método que sempre permite obter corpos de prova, após secagem, manuseáveis sem se esfarelar é o da moldagem por prensagem de massas semissecas. A simulação nos corpos de prova com 5 mm de espessura pode permitir a avaliação do comportamento da amostra no processo de prensagem e detectar defeitos nos moldes prensados das peças.

Para a confecção dos corpos de prova de argila pura foi utilizado um molde de aço com perfil retangular (80 mm x 20 mm x 5 mm) em cuja cavidade foi espalhada e distribuída uniformemente a massa da argila para poder ser executado o processo de prensagem. Depois que a cavidade do molde foi vedada com sua outra peça removível, o conjunto molde-argila foi levado para uma prensa uniaxial. A prensa foi configurada para receber o conjunto molde-argila e as amostras foram moldadas numa pressão de 400 kgf/cm² (40MPa) por 60 segundos.

Devido à cavidade do molde e da pressão sofrida, a argila ficou em forma de barra, dando origem aos corpos de prova. No processo de compactação da argila pura foi avariado um corpo de prova, resultando oito peças. Após a confecção dos corpos de cerâmica verde, sem adição de lodo, foram medidas suas massas, em gramas, com o auxílio de balança analítica e suas espessuras, larguras e seus comprimentos, em mm, com o auxílio de um paquímetro digital.

5.4.2 Preparação dos corpos de prova de argila com lodo

O mesmo procedimento de preparação dos corpos de prova de argila pura foi aplicado para as misturas de argila e lodo nas porcentagens de 5, 10, 15, 20 e 25%.

No processo de compactação para a mistura com lodo foram avariados três corpos de prova, sendo um na mistura com 5%, um na mistura com 15% e um na mistura com 20%.

A identificação dos corpos de prova está disponível na Tabela 2.

Tabela 5. Identificação dos 62 corpos de prova gerados.

Código	8 CORPOS DE PROVA DE ARGILA PURA
1A	Corpo de prova nº 1 de argila pura
2A	Corpo de prova nº 2 de argila pura
3A	Corpo de prova nº 3 de argila pura
4A	Corpo de prova nº 4 de argila pura
5A	Corpo de prova nº 5 de argila pura
6A	Corpo de prova nº 6 de argila pura
7A	Corpo de prova nº 7 de argila pura
8A	Corpo de prova nº 8 de argila pura
Código	10 CORPOS DE PROVA DE ARGILA COM 5% DE LODO
1LA5%	Corpo de prova nº 1 de argila com 5% de lodo
2LA5%	Corpo de prova nº 2 de argila com 5% de lodo
3LA5%	Corpo de prova nº 3 de argila com 5% de lodo
4LA5%	Corpo de prova nº 4 de argila com 5% de lodo
5LA5%	Corpo de prova nº 5 de argila com 5% de lodo
6LA5%	Corpo de prova nº 6 de argila com 5% de lodo
7LA5%	Corpo de prova nº 7 de argila com 5% de lodo
8LA5%	Corpo de prova nº 8 de argila com 5% de lodo
9LA5%	Corpo de prova nº 9 de argila com 5% de lodo
11LA5%	Corpo de prova nº 11 de argila com 5% de lodo
Código	12 CORPOS DE PROVA DE ARGILA COM 10% DE LODO
1LA10%	Corpo de prova de argila nº 1 com 10% de lodo
2LA10%	Corpo de prova de argila nº 2 com 10% de lodo
3LA10%	Corpo de prova de argila nº 3 com 10% de lodo
4LA10%	Corpo de prova de argila nº 4 com 10% de lodo
5LA10%	Corpo de prova de argila nº 5 com 10% de lodo
6LA10%	Corpo de prova de argila nº 6 com 10% de lodo
7LA10%	Corpo de prova de argila nº 7 com 10% de lodo
8LA10%	Corpo de prova de argila nº 8 com 10% de lodo
9LA10%	Corpo de prova de argila nº 9 com 10% de lodo

Tabela 2. Continuação

10LA10%	Corpo de prova de argila nº 10 com 10% de lodo
11LA10%	Corpo de prova de argila nº 11 com 10% de lodo
12LA10%	Corpo de prova de argila nº 12 com 10% de lodo
Código	12 CORPOS DE PROVA DE ARGILA COM 15% DE LODO
1LA15%	Corpo de prova de argila nº 1 com 15% de lodo
2LA15%	Corpo de prova de argila nº 2 com 15% de lodo
3LA15%	Corpo de prova de argila nº 3 com 15% de lodo
4LA15%	Corpo de prova de argila nº 4 com 15% de lodo
6LA15%	Corpo de prova de argila nº 6 com 15% de lodo
7LA15%	Corpo de prova de argila nº 7 com 15% de lodo
8LA15%	Corpo de prova de argila nº 8 com 15% de lodo
9LA15%	Corpo de prova de argila nº 9 com 15% de lodo
10LA15%	Corpo de prova de argila nº 10 com 15% de lodo
11LA15%	Corpo de prova de argila nº 11 com 15% de lodo
12LA15%	Corpo de prova de argila nº 12 com 15% de lodo
13LA15%	Corpo de prova de argila nº 13 com 15% de lodo
Código	10 CORPOS DE PROVA DE ARGILA COM 20% DE LODO
2LA20%	Corpo de prova de argila nº 2 com 20% de lodo
3LA20%	Corpo de prova de argila nº 3 com 20% de lodo
4LA20%	Corpo de prova de argila nº 4 com 20% de lodo
5LA20%	Corpo de prova de argila nº 5 com 20% de lodo
6LA20%	Corpo de prova de argila nº 6 com 20% de lodo
7LA20%	Corpo de prova de argila nº 7 com 20% de lodo
8LA20%	Corpo de prova de argila nº 8 com 20% de lodo
9LA20%	Corpo de prova de argila nº 9 com 20% de lodo
10LA20%	Corpo de prova de argila nº 10 com 20% de lodo
11LA20%	Corpo de prova de argila nº 11 com 20% de lodo
Código	10 CORPOS DE PROVA DE ARGILA COM 25% DE LODO
1LA25%	Corpo de prova de argila nº 1 com 25% de lodo
2LA25%	Corpo de prova de argila nº 2 com 25% de lodo
3LA25%	Corpo de prova de argila nº 3 com 25% de lodo
4LA25%	Corpo de prova de argila nº 4 com 25% de lodo
5LA25%	Corpo de prova de argila nº 5 com 25% de lodo
6LA25%	Corpo de prova de argila nº 6 com 25% de lodo
7LA25%	Corpo de prova de argila nº 7 com 25% de lodo
8LA25%	Corpo de prova de argila nº 8 com 25% de lodo
9LA25%	Corpo de prova de argila nº 9 com 25% de lodo
10LA25%	Corpo de prova de argila nº 10 com 25% de lodo

Após a compactação da amostra da argila pura e da argila misturada com o lodo os corpos de provas apresentaram as seguintes características: puderam ser manuseados sem sofrerem quebras, não apresentaram trincas, suas arestas não sofreram deformações e apresentaram cores de tom marrom claro. A Figura 8 mostra alguns dos 62 corpos de provas que passaram pelo processo de prensagem.

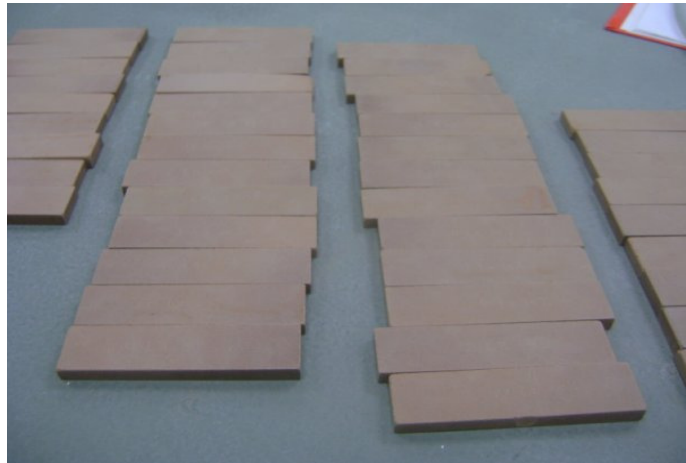


Figura 11. Corpos de prova após o processo de prensagem.

5.5 Tratamentos térmicos dos corpos de prova

5.5.1 Processo de Secagem

Após a compactação e identificação, os corpos de prova foram secos em estufa ventilada a 110°C por 24 horas e em seguida acondicionados em dessecador, até estabilizar a temperatura e evitar a absorção de umidade do ambiente. Depois foram medidas suas massas secas em balança analítica e suas dimensões usando-se um paquímetro digital. Após a secagem das amostras os corpos de provas puderam ser manuseados sem sofrerem quebras, não apresentaram trincas, suas arestas não sofreram deformações e apresentaram, também, cores de tom marrom claro. A Figura 9 mostra alguns corpos de provas que passaram pelo processo de secagem.

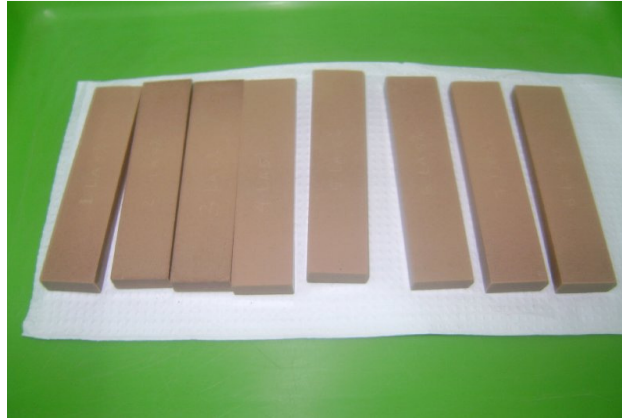


Figura 12. Corpos de prova após o processo de secagem.

5.5.2 Processo de Queima

O Processo de Queima dos corpos de prova foi realizado em forno mufla em atmosfera oxidante no Laboratório de Cerâmica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA nas temperaturas entre 110°C a 950°C. A velocidade de aquecimento programada para a primeira etapa foi de 2°C/min, até um patamar de 110°C por 1 hora. Para a segunda etapa foi de 5°C/min, até um patamar de 550°C por 1 hora. Após este patamar, manteve-se a velocidade de aquecimento em 5° C/min até um patamar de 950°C por 3 horas. A temperatura de queima em função do tempo está representada na Figura 10.

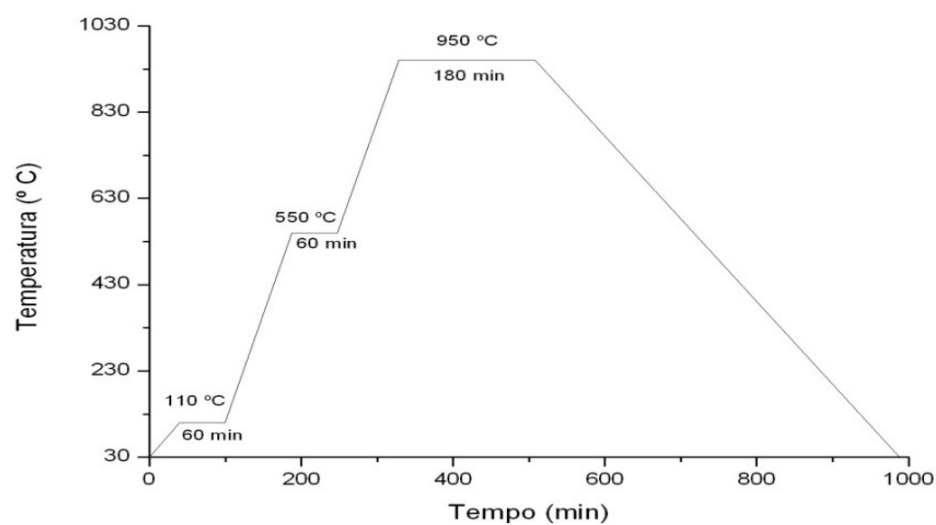


Figura 13. Curva de Queima dos corpos de prova.

Esta escala de temperatura foi escolhida, pois segundo Souza Santos (1989) essas são as temperaturas usadas normalmente na fabricação de cerâmica vermelha. A Figura 11 mostra a disposição de alguns corpos de provas dentro do forno mufla.



Figura 14. Disposição dos corpos de prova dentro do forno mufla.

O resfriamento dos corpos se deu naturalmente durante a noite até a temperatura ambiente. Após o resfriamento, os mesmos foram colocados em dessecador para evitar a absorção de umidade do ambiente. Depois foram medidas suas massas queimadas e suas dimensões. Após a Queima, os corpos de provas puderam ser manuseados sem sofrerem quebras, não apresentaram trincas, apenas dois corpos apresentaram desgastes em suas arestas e apresentaram cores de tom avermelhado claro. A Figura 12 mostra alguns corpos de prova após o processo de queima.

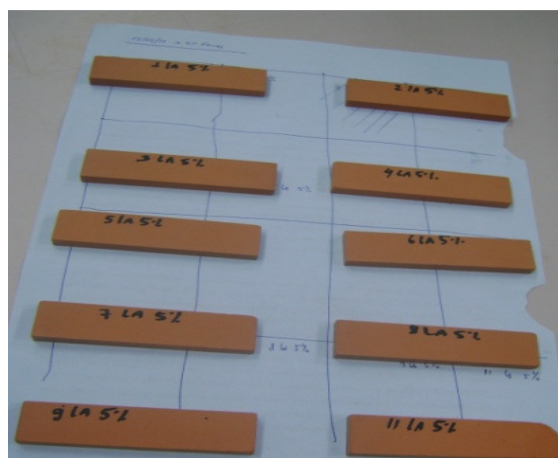


Figura 15. Corpos de prova após o processo de queima.

5.6 Ensaios de caracterização

5.6.1 Fluorescência de Raios X

As análises químicas quantitativas de Fluorescência de Raios X da argila e do lodo podem ser verificadas e comparadas na Tabela 6. Observa-se que as matérias primas são constituídas predominantemente por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O e TiO_2 e em menores concentrações por MgO , BaO , P_2O_5 e CaO para a argila e em menores concentrações por MgO , SO_3 , P_2O_5 , CaO para o lodo. As substâncias K_2O e CaO , provavelmente agentes eficientes na formação de fase líquida durante a sinterização em baixas temperaturas de fusão, apresentaram-se em menores concentrações em relação aos elementos predominantes detectados.

A análise química, em termos dos componentes expressos pelos óxidos SiO_2 (Óxido de silício), Al_2O_3 (Óxido de alumínio) e Fe_2O_3 (Óxido de ferro), corresponde a aproximadamente 91% da composição do lodo e 89,2% da composição da argila.

Tabela 6. Óxidos dos elementos químicos da argila e do lodo detectados por ED-XRF

Óxidos presentes	Concentrações (%)	
	Argila	Lodo
SiO_2	58,33	52,19
Al_2O_3	15,96	17,70
Fe_2O_3	14,98	21,09
K_2O	5,57	4,08
TiO_2	2,02	2,03
MgO	0,70	0,54
SO_3	-	0,45
BaO	0,65	-
P_2O_5	0,49	0,78
CaO	0,44	0,31

A adição do lodo na argila contribui para diminuir a resistência das peças, pois nele existe uma menor concentração de óxido de silício em relação à argila. Por outro lado, o

lodo possui um maior percentual de óxido de titânio que, provavelmente, pode contribuir na resistência dos corpos de prova.

Os resultados de Tartari (2008) oriundos de ensaios preliminares para verificar a capacidade de formar corpo cerâmico apenas com lodo puro, gerado na Estação de Tratamento de Água da unidade Tamanduá em Foz do Iguaçu – PR, queimado a 950°C, mostraram inviabilidade, pois os corpos de prova apresentaram trincas e desgastes. Provavelmente, isso acontece devido ao lodo puro apresentar elevada porcentagem de umidade e de matéria orgânica e a porosidade do grânulo favorecer a retenção de água nos poros, influenciando consideravelmente a retração e a deformação das peças cerâmicas.

5.6.2 Difração de Raios X

O difratograma do lodo de ETA, mostrado na Figura 16, nos permitiu identificar as fases cristalinas constituintes dos seguintes minerais: do Quartzo (SiO_2), da Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), da Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) e da Nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) que apresenta a mesma unidade estrutural da Caulinita. Estes resultados concordam com as análises químicas feitas por XRF: a fase majoritária do Quartzo pode estar relacionada com a presença do óxido de silício, cuja concentração na amostra do lodo é majoritária, chegando a 52,19%. A fase da Caulinita pode estar relacionada com os componentes expressos pelo óxido de silício e de alumínio, cuja concentração chegou a 69,89%. A fase da Muscovita, provavelmente, está relacionada com pequenas concentrações de óxido de potássio com filossilicatos na amostra. A fase da Nacrita pode estar relacionada com silicato argiloso de alumínio que ocorre com a Caulinita. O componente expresso pelo óxido de ferro, cuja concentração chega a 21,09% pode estar relacionado com a fase NI (não identificada) ou com a Muscovita, pois a mesma é um silicato de potássio que possui pequenas quantidades de ferro férrico e ferroso, além de outras substâncias.

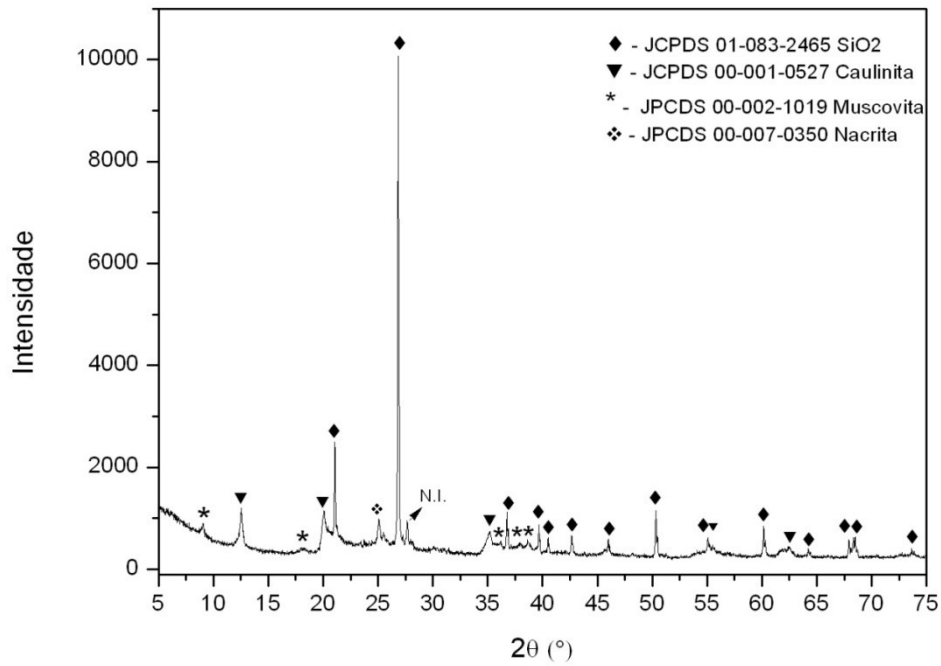


Figura 16. Difratoograma de raios X do lodo.

O difratograma da argila, mostrado na Figura 17, nos permitiu identificar as mesmas fases do lodo, com exceção da Microlina, que é um mineral do grupo dos feldspatos potássicos, cuja composição química é dada pela fórmula $KAlSi_3O_8$. Sua presença pode estar relacionada à presença de componentes expressos por óxido de potássio, de sílica e alumínio, mostrados na análise feita por XRF.

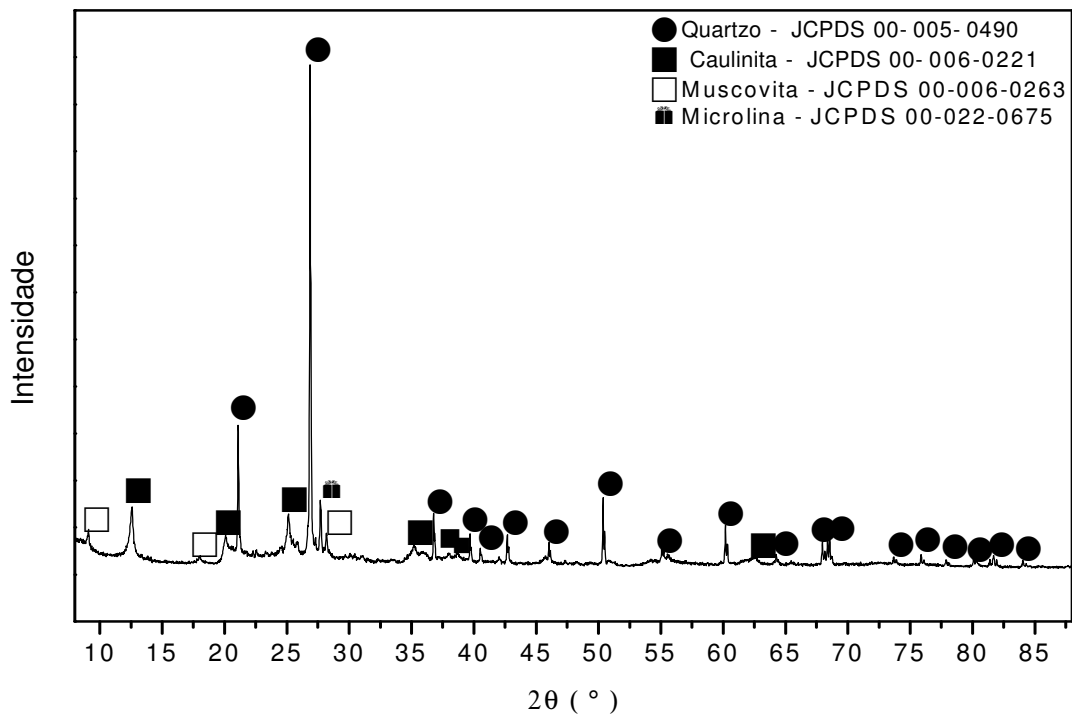


Figura 17. Difratoograma de raios X da argila.

5.6.3 Análises Térmicas

A Figura 18 representa as curvas da análise termogravimétrica do lodo, As curvas indicam que para o resíduo lodo são identificados três eventos associados à perda de massa durante o aquecimento no intervalo de 29°C a 1350°C.

Observa-se, de acordo com a Figura 18, uma perda de massa de aproximadamente 4,33%, devido à eliminação de água adsorvida a sua superfície, que ocorre até aproximadamente 200°C. Entre 200°C e 800°C existe perda de massa, que em geral está associada à decomposição da matéria orgânica presente, de aproximadamente 11,08%. Por último, entre 800°C e 1350°C existe a perda de massa associada à decomposição de argilominerais de 2,83%. Ao todo a análise térmica mostrou uma perda de massa equivalente a 18,24%.

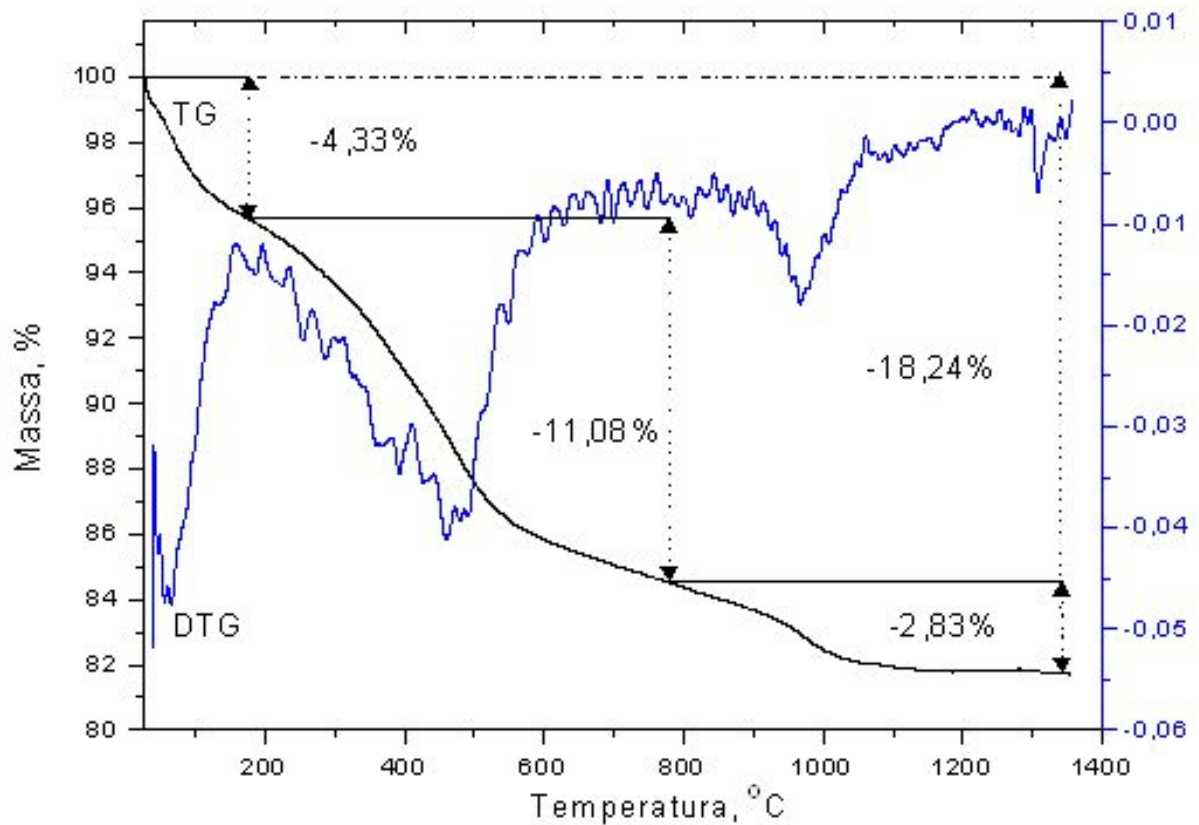


Figura 18. TG e DTG do lodo de ETA.

5.6.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 19 apresenta características morfológicas típicas dos grãos do lodo de ETA. A micrografia mostrada na Figura 19 (A) apresenta uma ampliação de 4000 vezes da amostra de lodo. Nesta micrografia observaram-se partículas com diâmetros de poucos micrometros aderidos as faces de grãos maiores com diâmetros de dezenas de micrometros. Esse comportamento é característico para amostras de lodo, dado a existência de material orgânico e inorgânico. Sendo assim, o lodo apresenta-se heterogêneo, como pode ser observado na Figura 19 (B).

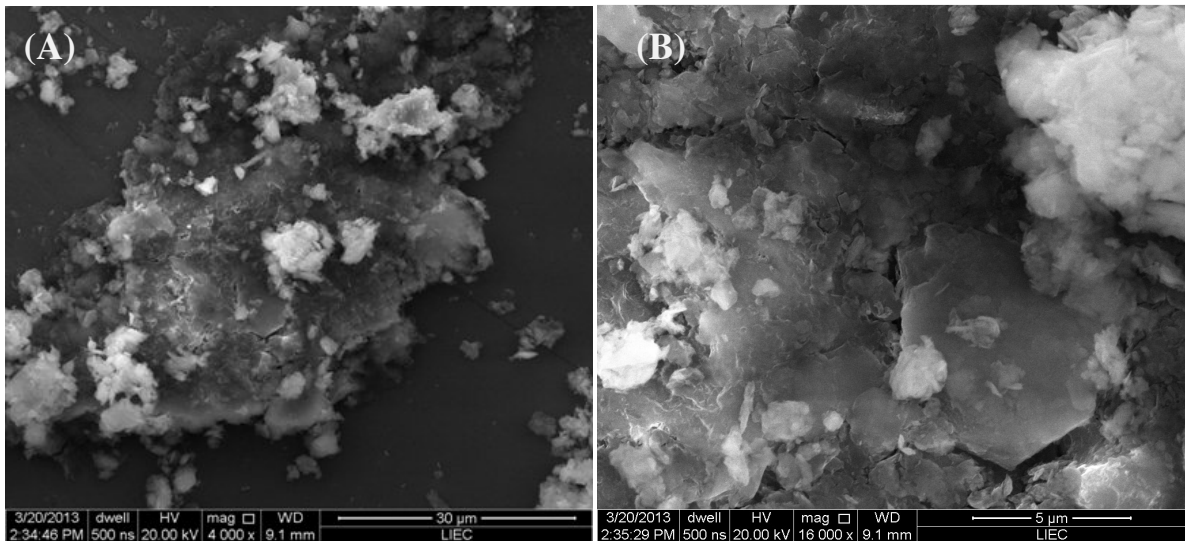


Figura 19. Micrografias obtidas por MEV lodo de ETA.

Na Figura 20 têm-se as micrografias da argila pura. A Figura 20 (A), com aumento de 2000 vezes, mostra que na argila há grãos grandes aglomerados com partículas menores. Na Figura 20 (B), observa-se que as partículas menores são compostas por grãos de formas variadas. Esse comportamento está de acordo com os resultados de difração de raios X, no qual foi observada a existência de várias fases cristalinas.

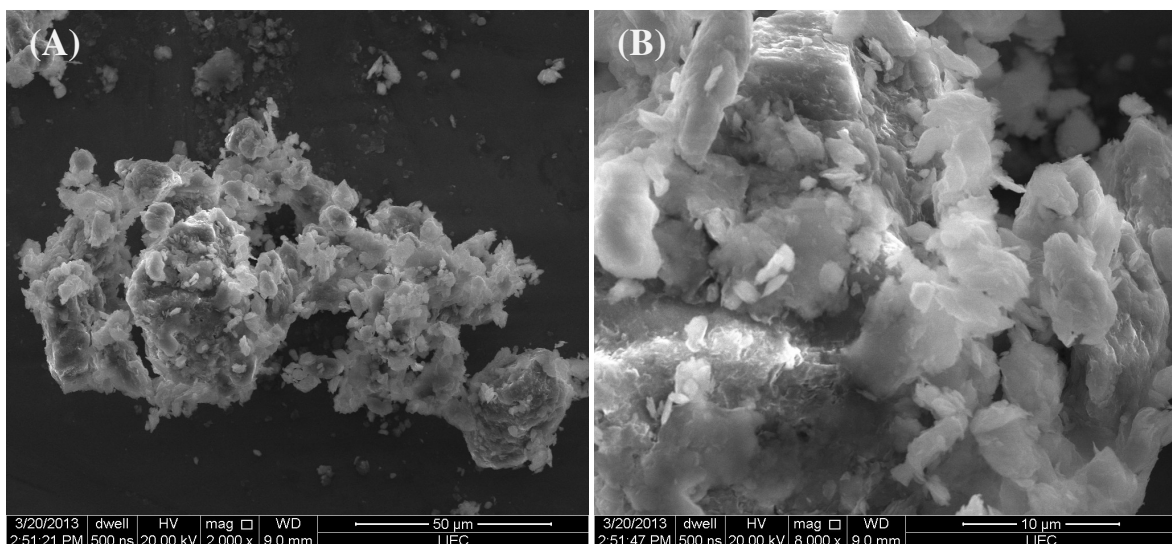


Figura 20. Micrografias obtidas por MEV da argila.

5.7 Ensaios tecnológicos

Os Ensaios tecnológicos de Retração Linear de Queima e Perda ao Fogo foram realizados, antes do ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão, em 62 corpos de prova. Os ensaios de TRF foram realizados em 31 corpos de prova. Os ensaios de Absorção de Água, Massa específica Aparente e Porosidade Aparente foram realizados nos outros 31 corpos de prova restantes. Porém, para efeitos estatísticos qualitativos, esses ensaios tecnológicos foram feitos em 24 corpos de prova, sendo 4 corpos sem adição de lodo (0%) e 20 corpos misturados com 5, 10, 15, 20 e 25% de lodo, distribuídos 4 corpos para cada porcentagem de mistura.

5.7.1 Ensaios de Tensão de Ruptura à Flexão

Os relatórios de ensaios dos testes de Tensão de Ruptura à Flexão podem ser verificados no anexo E. A Figura 21 mostra os valores médios encontrados, em MPa, nos ensaios de TRF dos corpos de prova, confeccionados com e sem adição de lodo, submetidos ao processo de queima a 950°C.

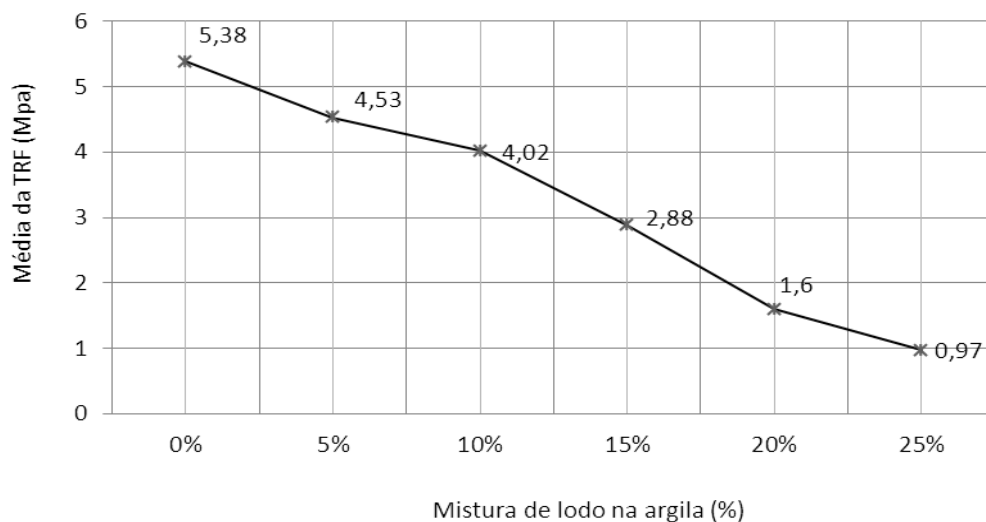


Figura 21. Variação da TRF em função da porcentagem de lodo na argila.

Pelo resultado mostrado na Figura 21, quanto maior é a porcentagem de lodo na argila menor é o valor da Tensão de Ruptura à Flexão, o que exige até certo cuidado nos

manuseios dos corpos de provas. A média da Tensão Máxima para os 4 corpos de prova misturados com 10% de lodo, calculada do Anexo E, correspondente a 4,57 MPa, apresentou-se acima do resultado esperado e não ficou coerente com o desvio padrão. Provavelmente, tal resultado está relacionado a algum erro de processamento do ensaio dos corpos. Esse resultado exigiu o emprego de um tratamento estatístico específico, no caso, o Teste Q. Portanto, para uma confiabilidade de 99% a nova medida da Tensão Máxima chegou a 4,02, conforme mostra a Figura 21.

Segundo ABNT NBR 7170:1983, a resistência mínima à compressão em tijolos comuns maciços para a categoria A é 1,5 Mpa, para a categoria B é 2,5 Mpa e para a categoria C é 4,0. Segundo SOUZA SANTOS (1989) para que uma massa cerâmica possa ser usada para a fabricação de tijolos e telhas, os valores-limites da Tensão de Ruptura da massa após a queima são os seguintes:

- Para tijolos de alvenaria equivale a 20kgf/cm^2 (2 Mpa);
- Para tijolos furados equivale a 55kgf/cm^2 (5,5 Mpa);
- Para telhas equivale a 65kgf/cm^2 (6,5 Mpa).

Os resultados mostram que a massa argilosa, misturada com lodo a 20%, é adequada para a fabricação de tijolos maciços de categoria A. A massa argilosa, misturada com lodo de 5 a 15%, é adequada para a fabricação de tijolos maciços de categorias B. A massa argilosa, misturada com lodo de 5 a 10%, é adequada para a fabricação de tijolos maciços de categorias C. A massa argilosa pura é adequada para a fabricação de tijolos maciços, porém, é inadequada para fabricação de telhas e se aproximou para os valores padrões para fabricação de blocos perfurados.

Como o ensaio de TRF objetivou medir a resistência mecânica do produto final, quando o mesmo foi submetido a forças perpendiculares sobre suas faces, na prática, é fundamental que esse produto possua uma boa resistência com relação à pressão exercida pelo peso, por exemplo, de uma parede sobre o mesmo. Portanto, é importante o atender aos critérios das normas vigentes a fim de evitar rachaduras em paredes e outros desastres nos setores da construção civil.

Foi observado que todos os valores do ensaio de TRF foram diminuindo de acordo com a quantidade de lodo adicionado na argila, como é mostrado na Figura 21. Provavelmente, esse fato pode estar relacionado ao aumento da porosidade do material devido à perda ao fogo que, como veremos mais adiante, aumentou com a adição de lodo na massa cerâmica.

Com o aumento da temperatura de queima os valores da TRF podem aumentar, visto que há um aumento na densificação dos corpos e, conseqüentemente, a redução da porosidade dos corpos de prova.

Todos os corpos de prova usados nesse ensaio apresentaram cor em tom avermelhado.

5.7.2 Absorção de Água

O ensaio tecnológico de Absorção de Água foi usado para verificar o percentual de água absorvida pelos corpos de prova, calculado por meio da diferença entre a massa úmida e a massa de queima dos corpos. É um importante fator que pode interferir na durabilidade do material cerâmico, pois, pode estar diretamente relacionado com sua resistência mecânica e com ataques químicos e físicos oriundos do meio no qual será empregado. Os valores referenciais de Absorção de Água estabelecidos pela ABNT NBR 15270-1:2005, para blocos cerâmicos e para alvenaria de vedação, são de no mínimo 8% e no máximo 22%.

A Figura 22 mostra os valores médios encontrados, em porcentagem, nos ensaios de Absorção de Água dos corpos de prova, confeccionados com e sem adição de lodo. Verificou-se que todas as composições queimadas, na temperatura de 950°C, não ultrapassaram os valores de Absorção de Água, recomendados pela ABNT NBR 15270-1:2005.

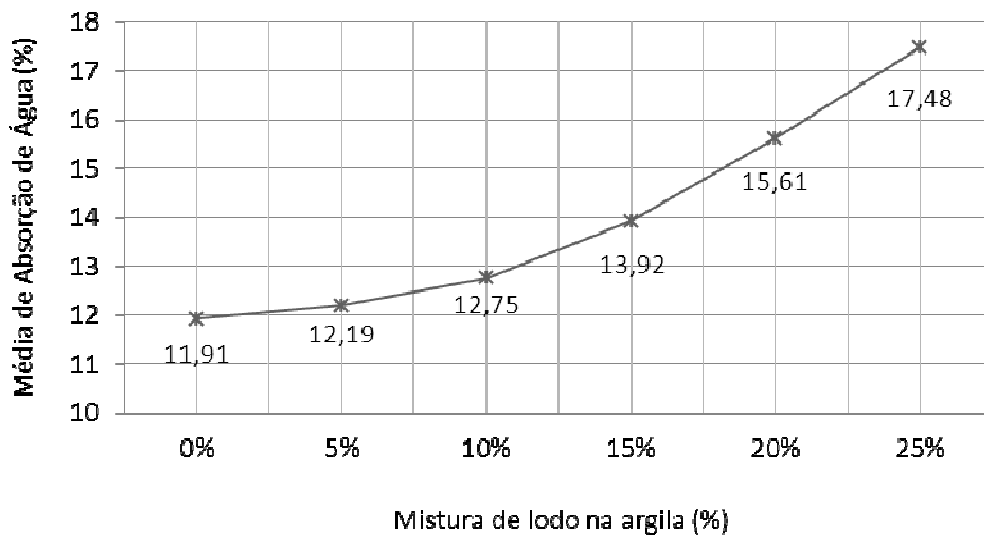


Figura 22. Absorção de Água em função da porcentagem de lodo na argila.

Foi observado que quanto maior a quantidade de lodo incorporada à argila, maior o percentual de Absorção de Água. Essa condição, provavelmente, pode estar relacionada à quantidade de matéria orgânica no lodo, contribuindo assim para o aumento da porosidade do corpo de prova. Observamos que, na análise térmica do lodo, essa matéria orgânica foi significativamente eliminada entre 200°C e 800°C.

Na prática, em uma construção civil, tijolos com elevadas taxas de absorção de água podem absorver a água existente na argamassa do reboco das paredes, tornando-a seca e sem poder de aderência.

5.7.3 Porosidade Aparente

A Figura 23 mostra os valores médios encontrados, em porcentagem, nos ensaios de Porosidade Aparente dos corpos de prova, confeccionados com e sem adição de lodo.

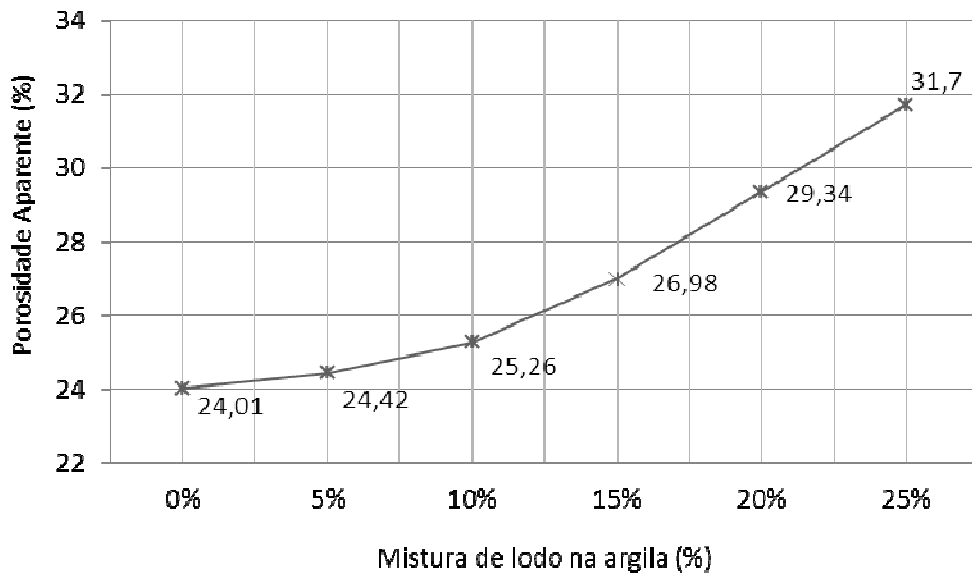


Figura 23. Porosidade Aparente em função da porcentagem de lodo na argila.

Os resultados sugerem que a Porosidade Aparente obteve maiores percentuais nas composições com adição de 25% de lodo e menores percentuais na composição sem adição de lodo. Podemos comparar os resultados da Absorção de água e da Porosidade Aparente e observar que há uma relação direta entre ambos: quando há o aumento da Porosidade Aparente acontece um aumento da Absorção de água.

Segundo Tartari (2008), a PA considera apenas os poros abertos que absorvem água e é um método preponderante para avaliação dos materiais cerâmicos que deve ser confrontado diretamente com os resultados da Massa Específica Aparente e Absorção de água, de forma a avaliar a influência térmica com o grau de sinterização dos corpos de prova, em função das propriedades físico-mecânicas.

De acordo com Souza Santos (1989), para a utilização da massa na produção de blocos cerâmicos, após a Queima, a Porosidade Aparente deve estar em torno de 4% até 35%, conforme a Figura 24.

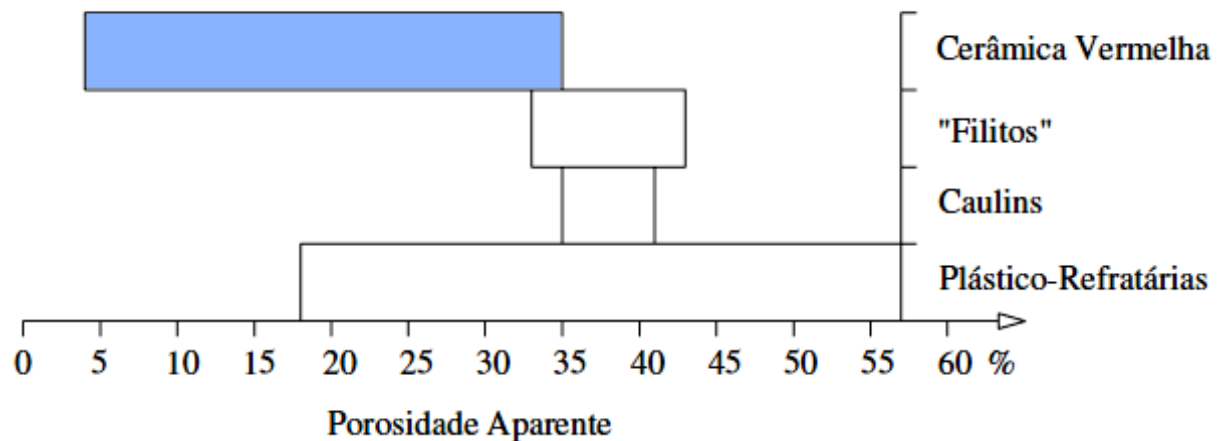


Figura 24. Faixa de variação da PA das argilas-padrão brasileiras após queima a 950°C.

Fonte: (Adaptado de Souza Santos, 1989. Pág. 205).

À medida que os corpos de prova foram recebendo energia térmica no processo de queima, suas massas específicas aumentaram e, conseqüentemente, suas porosidades diminuíram e suas resistências mecânicas melhoraram.

Uma grande quantidade de poros pode indicar que as peças não foram bem queimadas e influenciar na qualidade do produto final. O aumento da Porosidade pode aumentar a Absorção de Água, diminuir a massa específica aparente da cerâmica, bem como sua resistência mecânica, condutibilidade térmica e elétrica.

5.7.4 Retração Linear após a Queima (RLQ)

A média da Retração Linear de Queima para os 4 corpos de prova misturados com 5% de lodo, calculada do Anexo D, correspondente a -0,23% apresentou incoerência. Esse resultado exigiu o emprego do tratamento estatístico, Teste Q. Portanto, para uma confiabilidade de 99% a nova medida da porcentagem chegou a -0,30%, conforme mostra a Figura 25.

Os resultados obtidos, de acordo com a Figura 25, indicaram que a adição de lodo na massa cerâmica de 15 e 20% causou expansão linear nos corpos de prova, respectivamente, de -0,2% e -0,11%. Observou-se uma retração linear de 0,03%, oriundo da adição de lodo na massa cerâmica de 25%. A adição de 5 e 10% de lodo apresentou uma expansão linear que se aproximou do ensaio realizado no corpo de prova somente com argila, ou seja, de -0,34%. Segundo Souza Santos (1989), geralmente, as argilas devem apresentar mínima retração durante a secagem, porém, alguns materiais apresentam uma pequena expansão, pois devido à retirada da peça do molde, onde estava comprimida, a mesma fica livre de tensões e aumenta de tamanho e isso ocorre frequentemente com materiais que possuem elevado teor de quartzo e são moldados com baixa umidade. Assim, levando em consideração esse ensaio, a adição de 5 e 10% de lodo na mistura, pode ser adequada para a utilização na massa cerâmica, já que a expansão nessas peças pode ser considerada insignificante.

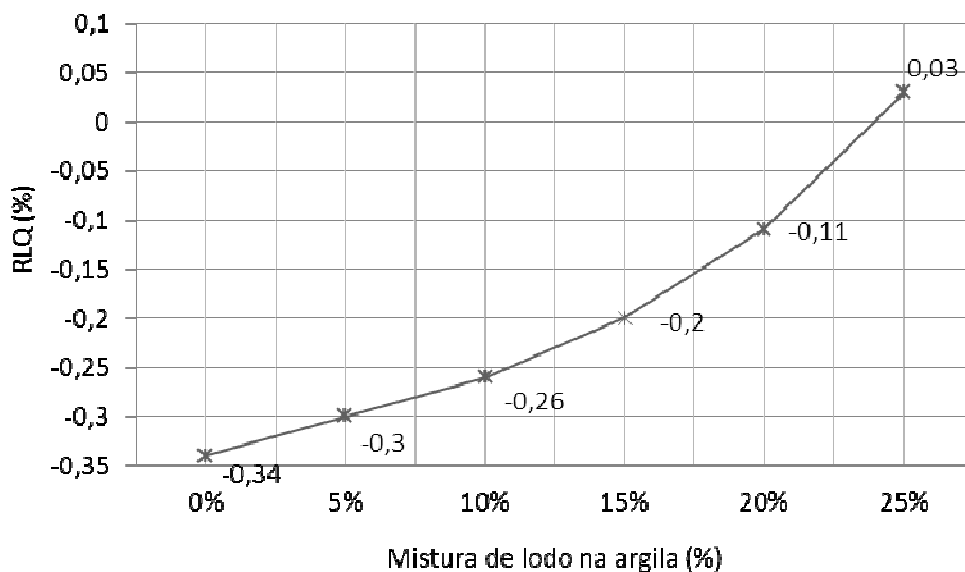


Figura 25. Retração Linear de Queima em função da adição de lodo na mistura de argila.

As matérias primas, lodo e argila, analisadas de acordo as técnicas de XRF e XRD são constituídas predominantemente por componentes que expressam o SiO_2 . Portanto, devido ao SiO_2 ter um elevado ponto de fusão, ser um componente refratário e expresso majoritariamente nas matérias primas analisadas, provavelmente, ele foi um fator que contribuiu para a expansão linear dos corpos de prova.

5.7.5 Massa Específica Aparente

Os resultados deste ensaio, de acordo com a Figura 26, indicaram uma tendência de diminuição da densidade aparente à medida que houve aumento da adição de lodo na massa argilosa. Esse comportamento, provavelmente, foi devido ao tamanho ou ao aumento do número de poros nos corpos de prova, à volatilização da matéria orgânica e ao tamanho dos grãos. A pequena diferença na densidade de $2,02 \text{ g/cm}^3$ para $1,81 \text{ g/cm}^3$, com a relação às misturas de argila pura (0%) de lodo e 25%, respectivamente, pode ter favorecido na contribuição da expansão dos corpos de prova.

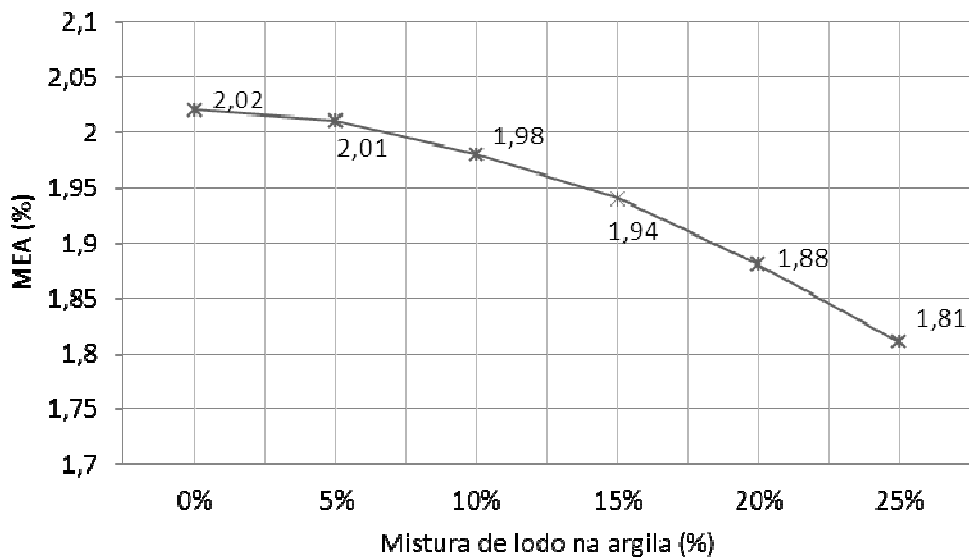


Figura 26. Massa Específica Aparente em função da adição de lodo na mistura de argila.

De acordo com Souza Santos (1989), para se utilizar uma massa argilosa em cerâmica vermelha os valores do ensaio de MEA, após a Queima, devem estar entre $1,7$ e $2,1 \text{ g/cm}^3$, conforme mostra a Figura 27. Portanto, todas as composições atenderam a esse requisito.

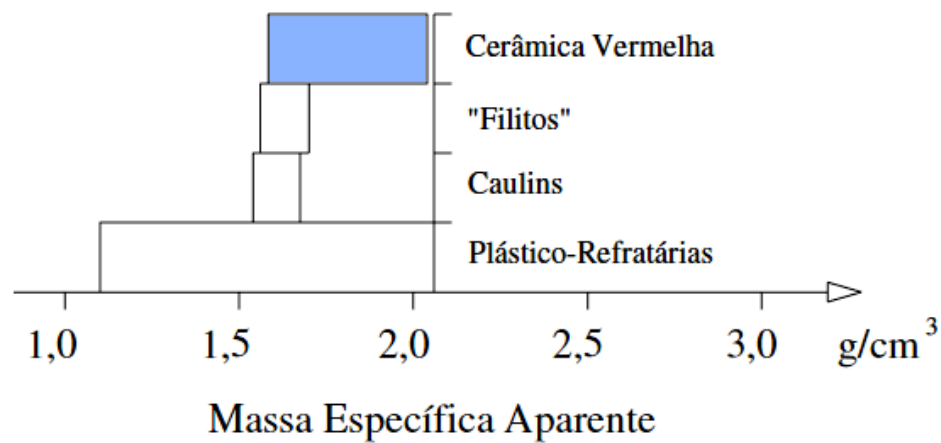


Figura 27. Faixa de variação da MEA das argilas-padrão brasileiras após queima a 950°C.

Fonte: (Adaptado de Souza Santos, 1989. Pág. 205).

5.7.6 Perda ao Fogo

A perda ao fogo das peças pode estar associada à presença de elementos que se volatilizaram durante o processo de queima, tais como: hidroxilas de argilominerais, hidróxidos, componentes de matéria orgânica e outros elementos. Observou-se na Figura 28 que, na temperatura de 950°C, a perda de massa dos corpos aumentou, respectivamente, de 4,86% para 6,29%, partindo da argila pura até a argila misturada com 25% de lodo. Assim, pode ter acontecido uma menor qualidade na mistura com o incremento da incorporação do lodo na argila. Segundo Souza Santos (1989), para um bloco cerâmico a perda ao fogo não deve ultrapassar a 15%.

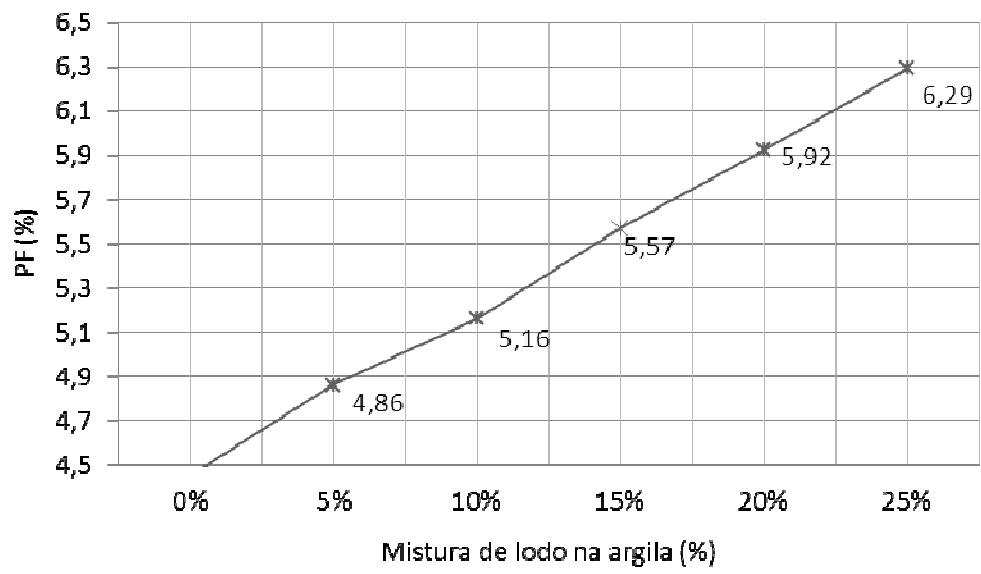


Figura 28. Perda ao Fogo em função da adição de lodo na mistura de argila.

6 CONCLUSÕES

As análises e interpretações dos resultados obtidos dos ensaios tecnológicos e das caracterizações das amostras de argila pura e argila misturada com lodo possibilitou chegar às seguintes conclusões:

A análise dos difratogramas para o lodo permitiu identificar as fases cristalinas constituintes dos seguintes minerais: Quartzo, Caulinita, Muscovita e da Nacrita. O difratograma para a argila nos permitiu identificar as mesmas fases do lodo, com exceção da Microlina. Estes resultados concordam com as análises químicas feitas por XRF nas matérias primas e nos permitem dizer que as matérias primas analisadas são adequadas para serem usadas em cerâmica vermelha.

Pelo fato da argila ser um recurso natural não renovável e de acordo com o estudo de suas propriedades mecânicas pelos ensaios tecnológicos, os resultados demonstraram que a mesma pode ser substituída, mesmo em pequenas quantidades, pelo resíduo lodo, podendo viabilizar o processo de construção civil e minimizar a perda desse tão valioso recurso natural. Por outro lado, a utilização do lodo em indústrias poderá contribuir positivamente para os seus locais receptores, evitando assoreamento de rios, a poluição de águas do manancial- fonte e seus impactos na sua fauna e flora aquática.

Algumas peças cerâmicas confeccionadas obedecem aos requisitos técnicos de qualidade. Os valores dos ensaios de TRF permitiram observar que a adição de lodo na argila não fere os padrões especificados para fabricação de cerâmica vermelha. Os ensaios de Absorção de Água dos corpos de prova, confeccionados com adição de lodo e dos corpos sem adição de lodo, não ultrapassaram aos valores de absorção de água recomendados. A perda de massa teórica nas peças cerâmicas, na temperatura de 950°C, cumpriu a exigência para corpos cerâmicos.

Os ensaios demonstraram que ocorreu uma pequena expansão linear, tanto do corpo de prova com argila pura como do corpo misturado com lodo, provavelmente, devido a fatores como: possuírem elevado teor de quartzo, da quantidade de água de prensagem

usada, e devido a essas matérias primas, após serem retiradas da peça do molde ficarem livre de tensões.

Os resultados obtidos nos ensaios estão de acordo com os referenciados pela ABNT, no que diz respeito à Perda ao Fogo com percentual inferior a 10%, à Retração Linear com percentual inferior a 6%, à Absorção de Água com percentual inferior a 20%, à Tensão de Ruptura à Flexão com percentual superior a 2MPa e à Massa Específica Aparente com percentual superior a superior a 1,7 g/cm³.

Portanto, os resultados do ensaio de TRF mostraram que algumas peças cerâmicas obtidas são propícias para serem usadas em cerâmicas vermelhas. Os valores dos ensaios de TRF mostraram que a adição de até 15% de lodo na argila obedece aos padrões especificados para fabricação de tijolos maciços, sendo viável a utilização de lodo de ETA como carga na argila para a produção de cerâmicas vermelhas associadas à sustentabilidade desse recurso mineral não renovável.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar a qualidade dos corpos de prova em temperaturas mais elevadas, conforme recomendações, tais como: 1000°C e 1050°C;
- Estudar as argilas dos polos produtores nordestinos de cerâmica vermelha, Itapecuru Mirim e Timon/Caxias, para verificar suas viabilidades de serem misturadas com lodo de ETAs para obtenção de cerâmicas vermelhas;
- Estudar o lodo oriundo da ETA do Italuís a fim de verificar sua viabilidade de serem misturados com as argilas dos polos de Imperatriz, Itapecuru Mirim e Timon/Caxias para obtenção de cerâmicas vermelhas;
- Fazer a análise granulométrica do lodo e da argila por peneiramento em conjunto de peneiras com malhas menores que #60 ABNT (0,250mm), tais como #80 ABNT , #100 ABNT , #200 ABNT e #325;
- Tentar promover uma maior integração entre companhias de saneamento, agências ambientais que cuidam de recursos hídricos e os polos produtores nordestinos de cerâmica vermelha para discutirem sobre questões ambientais, preservação da qualidade dos mananciais e aproveitamento do lodo gerado nas ETAs para fabricação de tijolos maciços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004 - Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

_____. *NBR 15270-3 - Componentes cerâmicos - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de Ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 27 p.

_____. *NBR 15310 - Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, Requisitos e Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 45 p.

_____. *NBR 7170 - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria*. Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1983. 4p.

AGENDA 21 BRASILEIRA - *Ações Prioritárias. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Nacional*. 2ª Ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004. 138p.

_____. *Resultado da Consulta Nacional. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Nacional*. 2ª Ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004.155p.

AGENDA 21 GLOBAL - *United Nations Conference on Environment & Development*. United Nations Sustainable Development. Brazil, Rio de Janeiro: 3 to 14 June 1992. 351p.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, D. P. *Ciência e engenharia dos materiais*. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASTM STANDARD C210 - 95 (1999) - *Test Method for Reheat Change of Insulating Firebrick*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999.3p.

_____. *C373 - 88 (2006) - Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2006.2p.

_____. *C674 - 88 (1999) - Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999. 4p.

BIDONE, F., SILVA, A.P., MARQUES D.M. Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs): Desidratação em Leitões de Secagem e Codisposição em Aterros Sanitários. In: Andreoli, C.V. (coordenador). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. 1ª edição. Rio de Janeiro. RiMa, ABES. 2001. Cap.9. p. 215-240.

BOSKOV GIMENEZ, MARIA EUGÊNIA. *Geotecnia Ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos. 2008. 248p.

BRASIL. *LEI Nº 12.305/2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº 9.605/98 e dá outras providências.

_____. *LEI Nº 9.433/97*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

_____. *LEI Nº 9.605/98*. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Publicado no Diário Oficial da União - DOU de 13.2.1998 e retificado no DOU de 17.2.1998.

_____. *Ministério da Saúde – Portaria nº 2.914, 12 de dezembro de 2011*. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Publicado no Diário Oficial da União - DOU de 16.05.2011.

CALLISTER JR., W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. Editora LTC, 7ª edição, 2008. 724 p.

CARVALHO, ANESIO RODRIGUES DE; OLIVEIRA, MARIA VENDRAMINI CASTRIGNANO. *Princípios básicos do saneamento do meio*. 10. ed. São Paulo: SENAC, 2010. 400 p. p.95-97.

CINTHYA HOPPEN. *Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo para preservação ambiental*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, 2004.

COCCHI, MONICA CHIUSANO. *Ensaio cerâmicos Preliminares (Parte prática)*. São Paulo, SENAI, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. *Resolução nº 357, 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicado no Diário Oficial da União - DOU nº 053, de 18.03.2005, págs. 58-63.

_____. *Resolução nº 430, 13 de março de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes complementam e alteram a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Publicado no Diário Oficial da União - DOU nº 092, de 16.05.2011, p. 89.

CORDEIRO, J.S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: Andreoli, C.V. (coordenador). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. 1ª edição. Rio de Janeiro. RiMa, ABES. 2001. Cap.5.p. 121-141.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. MELLO, Ivan Sergio de Cavalcanti. *Atlas de matérias primas cerâmicas do nordeste brasileiro* / Ivan Sergio de Cavalcanti Mello, José Francisco Marciano Motta, Marcelo Soares Bezerra, Julio de Rezende Nesi, Roberto Loretto Junior. São Paulo : CPRM, 2011. 184 p., il.

DURÁN, N.; MATTOSO, L.H.C.; MORAIS, O.C. *Nanotecnologia. Introdução, preparação e caracterização de nanomateriais e exemplos de aplicações*. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2006. 208p.

EWING, G.W. *Métodos Instrumentais de Análise Química, V.2, 8ª. Edição*, São Paulo, Edgard Blucher, 2006, 514 p.

GOMES, C. B. 1984. *Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia*, Edgard Blücher e Pró-minério. São Paulo, 218p.

HAGEMANN, S. E. *Materiais de Construção Básicos*. Ministério da Educação. Instituto Federal Sul-Rio-Grandense: Universidade Aberta do Brasil. Programa de Fomento ao Uso das Tecnologias de Comunicação e Informação nos Cursos de Graduação - TICS, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema IBGE de recuperação automática (SIDRA): *Pesquisa nacional de saneamento básico 2008 - Abastecimento de água - Tabelas 40 e 41*. Rio de Janeiro, 2010, pp. 106 -107.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Industrial and environmental applications of nuclear analytical techniques*. Vienna: IAEA, 1999.

KLEIN, CORNELIS; DUTROW, BARBARA. *Manual de ciência dos minerais*. 23. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2012. 706 p.

LOLLI, L.; NASSETTI, G.; MARINO L. F. B. *A Preparação a Seco de Massas Cerâmicas*. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 2, Março/Abril, 2000.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Anuário estatístico: setor de transformação de não metálicos*. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral. 2013.

NEUMANN, R.; SCHENEIDER, C.L.; NETO, A.A., *Tratamento de Minérios*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 867 p. Cap. 3: Caracterização Tecnológica de Minérios, p.55-109.

NEVILLE, A. M . *Tecnologia do concreto*. 2. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2010. 390 p.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F.. *Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha*. *Cerâmica*, São Paulo, v. 50, n. 316, Dec. 2004.

PAIXÃO, L. C. C. *Aproveitamento do lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha*. 2005. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Ouro Preto - MG.

REALI, M.A.P. Principais Características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In PENALVA REALI, N. (Org.), *Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs*. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 1.p.14.

RODÁ, I. (ed.). *Ciências, metodologías y técnicas aplicadas a la arqueología*. Univ. Autónoma de Barcelona: Bellaterra, 1992. 292 p.

SCHWANKE, C. *Ambiente: Tecnologias*. Série Tekne. 1. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013. 270 p. pp. 98 - 104.

SILVA, J.K.; RIBEIRO, C.C.S.; DUARTE, R.X.; SOBRINHO, C.W.A.P.; *Utilização de lodo de ETA na produção de blocos cerâmicos - escala industrial*. In: 26º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL ABES. Porto Alegre/RS, Setembro, 2011.

SMITH, WILLIAN; HASHEMI, JAVAD. *Fundamentos de engenharia e Ciência dos Materiais*. Editora McGraw-Hil, 5ª edição, 2010. 734 p.

SOUZA SANTOS, Pêrsio de. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2ª. ed. Vol. 1, São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 408p. p. 176 - 177.

TARTARI, R. *Incorporação de lodo gerado na estação de tratamento de água tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha*. 2008. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo - PR.

TARTARI, R. et al. *Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha*. *Cerâmica*, São Paulo, v. 57, n. 344, Dec. 2011.

TEIXEIRA, S. R. et al. *Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural*. *Cerâmica*, São Paulo, v.52, p. 215-220, 2006.

ANEXO A

Tabelas de Ensaio mecânicos realizados após a queima dos corpos de prova com argila pura.

Neste anexo são mostrados os valores dos ensaios de queima com tratamento térmico de até 950°C, em forno mufla, por um período de 24 horas, realizado em 62 corpos de prova, sendo que 31 corpos de prova foram separados para a realização do ensaio de tensão de ruptura à flexão. Todos os corpos de prova usados nesse ensaio apresentaram cor vermelha. Na Tabela 7 são mostrados os resultados dos ensaios de RLQ, TRF e PF, após queima, realizado em 4 corpos (1A, 2A, 3A e 4A) que não possuem incorporação de lodo em suas composições, submetidos à quebra, para determinação da tensão de ruptura e flexão.

Tabela 7. Ensaio após a queima nos corpos de prova de argila pura.

CP	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	P(kgf)	b(mm)	h(mm)	TRF(kgf/cm ²)	TRF(Mpa)	M _i (g)	M _q (g)	PF(%)
1A	80,22	80,13	80,37	-0,29	6,04	20,10	6,70	40,15	3,94	22,62	21,59	4,55
2A	80,20	80,14	80,35	-0,26	7,79	20,07	6,82	50,07	4,91	22,60	21,56	4,60
3A	80,38	80,33	80,54	-0,26	10,17	20,10	6,78	66,02	6,47	22,61	21,57	4,60
4A	80,27	80,14	80,38	-0,29	9,44	20,09	6,69	62,98	6,18	22,66	21,58	4,77
Méd	80,27	80,19	80,41	-0,28	8,36	20,09	6,75	54,81	5,38	22,62	21,58	4,63

Obs: Para efeitos estatísticos qualitativos, os ensaios tecnológicos de Retração Linear de Queima e Perda ao Fogo e Tensão de Ruptura à Flexão, Absorção de Água, Massa específica Aparente e Porosidade Aparente foram realizados em 24 corpos de prova (parte hachurada em todas as tabelas dos anexos), sendo 4 corpos sem adição de lodo (0%) e 20 corpos misturados com 5, 10, 15, 20 e 25% de lodo, distribuídos 4 corpos para cada porcentagem de mistura.

ANEXO B

Tabelas de Ensaio mecânicos realizados após a queima dos corpos de prova com 5% de lodo.

Na tabela 8 são mostrados os valores dos ensaios após queima com tratamento térmico de até 950°C, em forno mufla, por um período de 24 horas, de RLQ, TRF e PF em 5 corpos de prova que possuem 5% de lodo em sua composição e identificados da seguinte maneira: 1LA5%, 2LA5%, 3LA5%, 4LA5% e 5LA5%.

Tabela 8. Ensaio após a queima nos corpos de prova incorporados com 5% de lodo.

CP	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	P(kgf)	b(mm)	h(mm)	TRF(kgf/cm ²)	TRF(Mpa)	M _s (g)	M _q (g)	PF(%)
1LA5%	80,35	80,23	80,47	-0,31	5,90	20,07	6,73	43,60	4,28	21,8	20,68	4,96
2LA5%	80,32	80,17	80,44	-0,34	5,21	20,09	6,50	36,79	3,61	21,8	20,79	4,81
3LA5%	80,31	80,22	80,46	-0,31	4,58	20,08	6,48	32,61	3,20	21,7	20,62	4,80
4LA5%	80,25	80,11	80,32	-0,26	10,15	20,08	6,51	71,78	7,04	21,9	20,85	4,79
5LA5%	80,38	80,22	80,49	-0,34	12,41	20,06	6,57	85,96	8,43	21,8	20,69	4,96
Méd	80,32	80,19	80,44	-0,31	7,65	20,08	6,56	54,15	5,31	21,79	20,73	4,87

Na Tabela 9 são mostrados os valores dos ensaios após queima com tratamento térmico de até 950°C, em forno mufla, por um período de 24 horas, de RLQ, TRF e PF em 6 corpos de prova que possuem 10% de lodo em sua composição e identificados da seguinte maneira: 1LA10%, 2LA10%, 3LA10%, 4LA10%, 5LA10% e 6LA10%.

Tabela 9. Ensaio após a queima nos corpos de prova incorporados com 10% de lodo.

CP	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	P(kgf)	b(mm)	h(mm)	TRF(kgf/cm ²)	TRF(Mpa)	M _s (g)	M _q (g)	PF(%)
1LA10%	80,39	80,28	80,48	-0,26	7,86	20,06	6,52	55,30	5,42	21,6	20,47	5,14
2LA10%	80,38	80,32	80,51	-0,24	7,30	20,06	6,58	50,46	4,95	21,9	20,72	5,22
3LA10%	80,36	80,26	80,46	-0,25	7,08	20,06	6,50	50,11	4,91	21,5	20,40	5,20
4LA10%	80,36	80,25	80,50	-0,31	4,23	20,08	6,42	30,69	3,01	21,6	20,44	5,28
5LA10%	80,39	80,26	80,45	-0,24	10,20	20,08	6,39	74,66	7,32	21,5	20,38	5,17
6LA10%	80,41	80,32	80,49	-0,21	9,35	20,06	6,54	32,67	3,20	21,9	20,72	5,22
Méd	80,38	80,28	80,48	-0,25	7,67	20,07	6,49	48,98	4,80	21,65	20,52	5,20

Na Tabela 10 são mostrados os valores dos ensaios após queima com tratamento térmico de até 950°C, em forno mufla, por um período de 24 horas, de RLQ, TRF e PF em 6 corpos de prova que possuem 15% de lodo em sua composição e identificados da seguinte maneira: 1LA15%, 2LA15%, 3LA15%, 4LA15%, 6LA15% e 7LA15%.

Tabela 10. Ensaios após a queima nos corpos de prova incorporados com 15% de lodo.

CP	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	P(kgf)	b(mm)	h(mm)	TRF(kgf/cm ²)	TRF(Mpa)	M _s (g)	M _a (g)	PF(%)
1LA15%	80,46	80,31	80,48	-0,21	2,39	20,07	6,74	15,76	1,55	21,3	20,16	5,49
2LA15%	80,43	80,24	80,47	-0,28	6,44	20,06	6,41	46,86	4,60	21,29	20,10	5,59
3LA15%	80,45	80,29	80,45	-0,20	1,77	20,08	6,61	12,10	1,19	21,4	20,17	5,53
4LA15%	80,40	80,33	80,46	-0,16	5,97	20,07	6,48	42,49	4,17	21,2	20,04	5,65
6LA15%	80,44	80,30	80,45	-0,19	3,75	20,05	6,67	25,21	2,47	21,1	19,95	5,63
7LA15%	80,49	80,27	80,40	-0,16	11,82	20,07	6,68	79,16	7,76	21,3	20,07	5,86
Méd	80,44	80,29	80,45	-0,20	5,36	20,07	6,60	36,93	3,62	21,28	20,08	5,62

Na Tabela 11 são mostrados os valores dos ensaios após queima com tratamento térmico de até 950°C, em forno mufla, por um período de 24 horas, de RLQ, TRF e PF em 5 corpos de prova que possuem 20% de lodo em sua composição e identificados da seguinte maneira: 2LA20%, 3LA20%, 4LA20%, 5LA20% e 6LA20%.

Tabela 11. Ensaios após a queima nos corpos de prova incorporados com 20% de lodo.

CP	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	P(kgf)	b(mm)	h(mm)	TRF(kgf/cm ²)	TRF(Mpa)	M _s (g)	M _a (g)	PF(%)
2LA20%	80,62	80,50	80,57	-0,09	3,02	20,06	7,13	17,76	1,74	22,06	20,75	5,94
3LA20%	80,61	80,45	80,60	-0,19	2,29	20,08	7,15	13,39	1,31	21,7	20,38	6,21
4LA20%	80,60	80,49	80,57	-0,10	1,96	20,08	6,86	12,45	1,22	21,8	20,54	5,87
5LA20%	80,52	80,36	80,49	-0,16	3,26	20,07	6,73	21,53	2,11	21,6	20,38	5,82
6LA20%	80,54	80,41	80,48	-0,09	2,05	20,07	6,67	13,76	1,35	21,2	19,95	5,85
Méd	80,58	80,44	80,54	-0,12	2,52	20,07	6,91	15,78	1,55	21,69	20,40	5,94

Na Tabela 12 são mostrados os valores dos ensaios após queima com tratamento térmico de até 950°C, em forno mufla, por um período de 24 horas, de RLQ, TRF e PF em 5 corpos de prova que possuem 25% de lodo em sua composição e identificados da seguinte maneira: 1LA25%, 2LA25%, 3LA25%, 4LA25% e 5LA25%.

Tabela 12. Ensaios após a queima nos corpos de prova incorporados com 25% de lodo.

CP	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	P(kgf)	b(mm)	h(mm)	TRF(kgf/cm ²)	TRF(Mpa)	M _s (g)	M _a (g)	PF(%)
1LA25%	80,77	80,60	80,58	0,02	1,21	20,08	7,18	7,06	0,69	21,89	20,51	6,30
2LA25%	80,74	80,57	80,51	0,07	2,50	20,06	7,65	12,77	1,25	23	21,50	6,36
3LA25%	80,70	80,52	80,56	-0,04	2,38	20,06	7,02	14,43	1,41	22,2	20,73	6,50
4LA25%	80,73	80,56	80,58	-0,02	0,94	20,09	7,24	5,34	0,52	22	20,65	6,18
5LA25%	80,71	80,52	80,43	0,12	8,59	20,04	7,37	47,34	4,64	21,5	19,94	7,04
Méd	80,73	80,55	80,53	0,03	3,12	20,07	7,29	17,39	1,70	22,10	20,67	6,48

ANEXO C

Tabelas de Ensaio mecânicos obtidos usando a balança de Arquimedes após a queima nos corpos de prova com argila pura.

Na Tabela 13 são mostrados os resultados dos ensaios de RLQ, AA, MEA, PA e PF, após queima, realizado em 4 corpos (5A, 6A, 7A e 8A) que não possuem incorporação de lodo em suas composições e submetidos à quebra.

Tabela 13. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs de argila pura.

CP	M _i (g)	M _u (g)	M _s (g)	M _q (g)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	PF(%)
5A	13,48	24,27	22,6	21,64	12,15	24,37	2,01	80,3	80,2	80,42	-0,32	4,37
6A	13,43	24,07	22,6	21,56	11,64	23,59	2,03	80,2	80,1	80,38	-0,32	4,47
7A	13,45	24,08	22,6	21,58	11,58	23,52	2,03	80,4	80,3	80,59	-0,38	4,34
8A	13,48	24,28	22,7	21,63	12,25	24,54	2,00	80,3	80,2	80,42	-0,33	4,59
Méd	13,46	24,18	22,61	21,60	11,91	24,01	2,02	80,30	80,18	80,45	-0,34	4,45

ANEXO D

Tabelas de Ensaio mecânicos obtidos usando a balança de Arquimedes após a queima nos corpos de prova incorporados com 5%.

Na Tabela 14 são mostrados os resultados dos ensaios de RLQ, AA, MEA, PA e PF, após queima, realizado em 5 corpos (6LA5%, 7LA5%, 8LA5%, 9LA5% e 11LA5%) incorporados com 5% de lodo e não submetidos à quebra.

Tabela 14. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 5% de lodo.

CP	M _i (g)	M _o (g)	M _s (g)	M _q (g)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	PF(%)
6LA5%	12,95	23,24	21,80	20,78	11,84	23,91	2,02	80,31	80,18	80,43	-0,31	4,85
7LA5%	12,83	23,55	21,70	20,64	14,10	27,15	1,93	80,40	80,31	80,47	-0,19	4,71
8LA5%	12,93	23,34	21,80	20,74	12,54	24,98	1,99	80,35	80,23	80,47	-0,30	4,82
9LA5%	13,38	23,50	22,50	21,31	10,28	21,64	2,11	80,64	80,56	80,65	-0,11	5,08
11LA5%	12,62	23,44	21,50	20,38	15,01	28,28	1,88	80,61	80,52	80,61	-0,11	5,08
Méd	12,94	23,41	21,84	20,77	12,75	25,19	1,99	80,46	80,36	80,52	-0,20	4,91

Obs.: Considerando a média das tensões dos primeiros 4 CPs iniciais, para cada porcentagem de mistura, a porcentagem correspondente ao CP 9LA5% de -0,11% apresentou-se incoerente. Com o emprego de tratamento estatístico específico, no caso, o Teste Q, com 99% de confiabilidade, a medida da porcentagem de RLQ chegou a -0,40% e nova média das porcentagens de todos os 4 CPs chegou a -0,30%.

Na Tabela 15 são mostrados os resultados dos ensaios de RLQ, AA, MEA, PA e PF, após queima, realizado em 6 corpos (7LA10%, 8LA10%, 9LA10%, 10LA10%, 11LA10% e 12LA10%) incorporados com 10% de lodo e não submetidos à quebra.

Tabela 15. Ensaio obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 10% de lodo.

CP	M _i (g)	M _o (g)	M _s (g)	M _q (g)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	PF(%)
7LA10%	12,78	23,23	21,67	20,55	13,04	25,65	1,97	80,38	80,22	80,39	-0,22	5,17
8LA10%	12,77	23,16	21,58	20,46	13,20	25,99	1,97	80,33	80,24	80,47	-0,28	5,19
9LA10%	12,72	22,94	21,54	20,44	12,23	24,46	2,00	80,39	80,30	80,49	-0,24	5,11
10LA10%	12,74	23,01	21,57	20,45	12,52	24,93	1,99	80,44	80,24	80,48	-0,30	5,19
11LA10%	12,70	23,16	21,50	20,35	13,81	26,86	1,95	80,47	80,32	80,50	-0,22	5,35
12LA10%	12,75	23,12	21,59	20,46	13,00	25,65	1,97	80,29	80,19	80,40	-0,26	5,23
Méd	12,74	23,10	21,58	20,45	12,97	25,59	1,97	80,38	80,25	80,45	-0,25	5,21

Na Tabela 16 são mostrados os resultados dos ensaios de RLQ, AA, MEA, PA e PF, após queima, realizado em 6 corpos (8LA15%, 9LA15%, 10LA15%, 11LA15%, 12LA15% e 13LA15%) incorporados com 15% de lodo e não submetidos à quebra.

Tabela 16. Ensaios obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 15% de lodo.

CP	M _i (g)	M _o (g)	M _s (g)	M _q (g)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	PF(%)
8LA15%	12,58	23,10	21,36	20,20	14,36	27,57	1,92	80,43	80,33	80,50	-0,21	5,43
9LA15%	12,64	23,05	21,46	20,26	13,77	26,80	1,95	80,53	80,36	80,52	-0,19	5,59
10LA15%	12,60	22,95	21,39	20,22	13,50	26,38	1,95	80,49	80,32	80,52	-0,26	5,47
11LA15%	12,53	22,91	21,32	20,09	14,04	27,17	1,94	80,47	80,36	80,47	-0,13	5,77
12LA15%	12,61	23,06	21,20	20,00	15,30	29,28	1,91	80,46	80,31	80,51	-0,25	5,66
13LA15%	12,57	22,93	21,42	20,46	12,07	23,84	1,97	80,51	80,39	80,57	-0,23	4,48
Méd	12,59	23,00	21,36	20,21	13,84	26,84	1,94	80,48	80,34	80,51	-0,21	5,40

Na Tabela 17 são mostrados os resultados dos ensaios de RLQ, AA, MEA, PA e PF, após queima, realizado em 5 corpos (7LA20%, 8LA20%, 9LA20%, 10LA20% e 11LA20%) incorporados com 20% de lodo e não submetidos à quebra.

Tabela 17. Ensaios obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 20% de lodo.

CP	M _i (g)	M _o (g)	M _s (g)	M _q (g)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	PF(%)
7LA20%	13,29	24,70	22,66	21,28	16,07	29,97	1,87	80,58	80,53	80,55	-0,02	6,09
8LA20%	12,60	23,26	21,45	20,18	15,26	28,89	1,89	80,58	80,40	80,48	-0,10	5,92
9LA20%	12,69	23,56	21,58	20,35	15,77	29,53	1,87	80,62	80,42	80,57	-0,19	5,70
10LA20%	12,61	23,32	21,50	20,22	15,33	28,94	1,89	80,61	80,44	80,54	-0,12	5,95
11LA20%	12,30	22,70	20,94	19,72	15,11	28,65	1,90	80,78	80,49	80,62	-0,17	5,83
Méd	12,70	23,51	21,63	20,35	15,51	29,20	1,88	80,63	80,45	80,55	-0,12	5,90

Na Tabela 18 são mostrados os resultados dos ensaios de RLQ, AA, MEA, PA e PF, após queima, realizado em 5 corpos (6LA25%, 7LA25%, 8LA25%, 9LA25% e 10LA25%) incorporados com 25% de lodo e não submetidos à quebra.

Tabela 18. Ensaios obtidos usando a balança de Arquimedes em CPs com 25% de lodo.

CP	M _i (g)	M _o (g)	M _s (g)	M _q (g)	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	L _v (mm)	L _s (mm)	L _q (mm)	RLQ(%)	PF(%)
6LA25%	13,48	25,50	23,01	21,58	18,16	32,61	1,80	80,74	80,51	80,50	0,01	6,21
7LA25%	13,50	25,31	23,13	21,59	17,23	31,50	1,83	80,71	80,61	80,56	0,06	6,66
8LA25%	12,84	24,10	21,93	20,62	16,88	30,91	1,83	80,77	80,62	80,61	0,02	5,97
9LA25%	12,07	22,86	20,74	19,43	17,65	31,79	1,80	80,75	80,54	80,51	0,04	6,32
10LA25%	13,38	25,70	22,94	21,50	19,53	34,09	1,75	80,73	80,61	80,54	0,09	6,28
Méd	13,05	24,69	22,35	20,94	17,89	32,18	1,80	80,74	80,58	80,54	0,04	6,29

