UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS-PPGCEM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha

FRANCIOLLI DA SILVA DANTAS DE ARAÚJO

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar

Dissertação Nº 32/2008 PPgCEM

Natal, 2008

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

FRANCIOLLI DA SILVA DANTAS DE ARAÚJO

INFLUÊNCIA DO LODO DE ETE NA MASSA PARA FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia.

Orientador:

Prof. Dr. Wilson Acchar

NATAL/RN – AGOSTO/2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS-PPGCEM

DECLARAÇÃO

Declaramos, para todos os fins, que **Franciolli da Silva Dantas de Araújo,** defendeu sua Dissertação de Mestrado intitulada **"Influência de Iodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha"**, em 05 de Agosto de 2008, no Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tendo sido.....APROVADA..... , com conceito....B.....

Natal, 05 de Agosto de 2008.

Prof. Dr. Wilson Acchar
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Uilame Umbelino Gomes
Examinador Interno

Prof. Dr. Marcus Alexandre Diniz
Examinador Externo

Prof. Dr. Herval Ramos Paes Júnior
Examinador Externo

VISTO

Prof. Dr. Carlos Alberto Paskocimas
Vice-Coordenador do PPGCEM

Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / SISBI / Biblioteca Setorial Especializada
Especializada do Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET.

Araújo, Franciolli da Silva Dantas de.
Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha / Franciolli da Silva de Araújo. -- Natal, 2008.
76 f.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Acchar.

Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2008.

1. Reciclagem industrial - Dissertação. 2. Lodo - Dissertação. 3. Argila - Dissertação. 4. Cerâmica Vermelha - Dissertação. I. Acchar, Wilson. II. Título.

RN/UF/BSE-CCET CDU: 628.54

Dedico

Aos meus amados pais Francisco Dantas e Bernadete Oliveira e a minha amada esposa, Ana Paula.

AGRADECIMENTOS

Somente os que compartilharam os difíceis momentos conhecem as grandes dificuldades enfrentadas para chegar a este momento. Esta vitória não teria sido alcançada sem a ajuda de muitos, tantos que seria impossível citá-los todos. Àqueles aos quais meu sangue se misturou nesta batalha, agradeço...

Ao professor Wilson Acchar, meu orientador científico, que com muita paciência conduziu essa minha jornada conturbada com vistas ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao bolsista e aluno de doutorado Eduardo Galvão, que sempre esteve disponível no laboratório para realização dos ensaios e sempre que possível tirando dúvidas.

Ao professor do CEFET-RN José Yvan Pereira Leite pelo incentivo nos momentos difíceis, tendo sido o meu maior incentivador durante esse período, nunca permitindo que eu desistisse.

Ao professor Andre Luis Calado de Araújo, do CEFET-RN por esclarecimentos relacionados à engenharia sanitária.

Ao professor Eiji Arima que estava sempre próximo em momentos de dúvidas e ajudava no que podia no sentido de saná-las.

Aos amigos do laboratório de Processamento Mineral e de Resíduos do CEFET-RN, onde alguns ensaios foram realizados, Lana, Pádua, Araceli, Bruno, Viviane, Lídia, João Paulo, Everton, Paula, Cíntia, Phiética e Letícia que em muitos momentos me auxiliaram de alguma forma na elaboração deste trabalho, fosse cientificamente ou simplesmente nos momentos de descontração, quando as idéias não mais eram concatenadas.

As secretárias do PPgCEM, Renata, Evandra e Gabriele que sempre foram gentis e solícitas nas várias vezes que estive na coordenação do curso.

Aos colegas de curso, especialmente Hanna e Daniella, as quais tive o privilégio de trabalhar e conviver.

Aos meus familiares pela compreensão e incentivo constantes. Meus pais, Francisco e Bernadete, minha esposa, Ana Paula, e meus irmãos Camilo e Francisdete.

Ao programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais – PPgCEM da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por todas as condições oferecidas durante o mestrado.

“O homem que a dor não educou será sempre uma criança.”

N. Tommaseo

RESUMO

As ETE produzem vários tipos de resíduos em suas etapas de tratamento, mas o lodo é o resíduo mais problemático do ponto de vista de disposição final. A atual taxa de geração de resíduos, acarretada da evolução tecnológica e da crescente demanda populacional, impede a geração de um equilíbrio hábil entre o consumo e a reciclagem/reuso, gerando problemas de poluição resultantes da gestão inadequada dos resíduos. Dessa forma, é necessário atingir um novo equilíbrio entre o crescimento das demandas por matérias e energia e a geração de resíduos. Este equilíbrio, só pode ser alcançado através da viabilização técnica e econômica de modelos de sustentabilidade ambiental, através da reciclagem e do reuso. A indústria de cerâmica vermelha se destaca no quesito absorção de resíduos como matéria-prima em virtude da heterogeneidade das massas argilosas, constituídas de argilominerais e minerais não argilosos com ampla variação mineralógica, permitindo a inclusão de resíduos que atuem como plastificantes ou desplastificantes, e contribuindo também para a retenção de metais pesados presentes nos resíduos na massa vítrea formada nos corpos cerâmicos. Este trabalho propõe estudar a influência da incorporação de 25% de lodo de estação de tratamento de esgoto, baseado em resultados preliminares, à massa para produção de corpos cerâmicos. As matérias-primas foram caracterizadas através de análise da composição química por FRX, análise mineralógica por DRX, análise térmica por TG e DTA, análise dos limites de Atterberg e análise dilatométrica. Em seguida foi composta a massa com 75% de argila e 25% em peso de lodo da ETE UFRN. Foram prensados corpos-de-prova com dimensões 6,0 x 2,0 x 0,5 cm através de prensagem uniaxial sob pressão de 20MPa e queimadas nas temperaturas entre 950 e 1200ºC. Após a sinterização, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios físico-mecânicos através de medida de retração linear, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão; análise cristalográfica através de DRX e análise microestrutural através de MEV. As propriedades tecnológicas obtidas mostraram-se satisfatórias para fabricação de telhas com 25% de lodo na temperatura de queima de 1.200 ºC, não sendo viável a fabricação de outros produtos em temperaturas inferiores.

Palavras-chave: Reciclagem industrial, lodo, argila, cerâmica vermelha.

ABSTRACT

The WTP produce many kinds of residue on your treatment stages, but the sludge is the more problematic from the final disposition point view. The actual rate of residue production deriving from technological evolution and the crescent population needs prevents the subtle equilibrium generation between consumption and recycling/reuse, creating problems of pollution resulting from inappropriate management of residues. Thus, is necessary achieve a new equilibrium between the grow from raw materials and energy and the residue generation. This equilibrium should be achieved by technical and economic feasibility of environmental supported models through recycling and reuse. The red ceramic industry stand out in residue absorption question as raw material due their clay mass heterogeneity, constituted by clay minerals and non-clay minerals with wide mineralogical variation, allowing residue inclusion which act like plastic or non-plastic materials, contributing to retain heavy metals contained in residues in the vitreous mass formed during the burning of the ceramic bodies. This work propose the study of the influence of incorporation of 25 wt.% sludge from wastewater treatment plant, according preliminary results, in the mass to produce ceramic bodies. The raw materials was characterized through chemical composition analyses by XRF, mineralogical analyses by XRD, thermal analyses by TG and DTA, Atterberg limits and thermodilatometry. Subsequently was composed the mass with 75 wt.% of clay and 25 wt.% of dried wastewater sludge from UFRN WWTP. Samples with 6,0 x 2,0 x 0,5 cm was produced with unidirectional compacting under pressure of 20MPa and burned in temperatures between 950 and 1,200ºC. After fired, the ceramic bodies have been submitted to physical and mechanical analyses through the measure of firing shrinkage, water absorption, density, apparent porosity and flexural strength; crystallographic analyses through XRD and microstructure analyses by SEM. The technological properties obtained was satisfactory to production of roof tiles with 25 wt.% at 1,200 ºC, but the production of others products at lower temperatures was not feasible.

Key-words: industrial recycling, sewage sludge, clay, red ceramic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Absorção de água. Fonte: Quintana et al. (1999)..... 12
Figura 2: Tensão de ruptura dos corpos-de-prova prensados. Fonte: Quintana et al. (1999)... 13
Figura 3: Tensão de ruptura dos corpos-de-prova extrudados. Fonte: Quintana et al. (1999) . 13
Figura 4: Resultados de absorção em função da composição de filler de basalto. Fonte: Rebmann; Coelho e Salvetti (2001). 14
Figura 5: Tensão de ruptura à flexão das massas em função da temperatura de queima e porcentagem de filler de basalto. Fonte: Rebmann; Coelho e Salvetti (2001). 15
Figura 6: Absorção de água. Fonte: Santos et al. (2001)..... 15
Figura 7: Porosidade aparente. Fonte: Santos et al. (2001). 16
Figura 8: Resistência à flexão. Fonte: Santos et al. (2001). 16
Figura 9: Massa específica aparente. Fonte: Santos et al. (2001). 17
Figura 10: Retração linear de queima. Fonte: Santos et al. (2001). 17
Figura 11: Absorção de água. Fonte: Fonte: Ramires (2001)..... 18
Figura 12: Retração linear de queima. Fonte: Ramires (2001)..... 19
Figura 13: Massa específica aparente. Fonte: Ramires (2001)..... 19
Figura 14: Resistência mecânica. Fonte: Ramires (2001). 20
Figura 15: Absorção e retração linear de queima em função da temperatura. Fonte: Vieira et al. (2003)..... 21
Figura 16: Tensão de ruptura à flexão das massas cerâmicas versus temperatura de queima. Fonte: Vieira et al. (2003) 22
Figura 17: Massa específica aparente de queima. Fonte: Teixeira et al. (2005) 23
Figura 18: Retração linear total. Fonte: Teixeira et al. (2005) 23
Figura 19: Absorção de água. Fonte: Teixeira et al. (2005)..... 24
Figura 20: Porosidade aparente. Fonte: Teixeira et al. (2005) 24
Figura 21: Módulo de ruptura à flexão. Fonte: Teixeira et al. (2005)..... 24
Figura 22: Etapa de gradeamento. 26
Figura 23: Desareamento..... 27
Figura 24: Remoção de escuma..... 28
Figura 25: Lagoa de estabilização. 28
Figura 26: Absorção de água. Fonte: Weng; Lin e Chiang (2003)..... 38
Figura 27: Densidade aparente. Fonte: Weng; Lin e Chiang (2003)..... 39
Figura 28: Resistência a compressão. Fonte: Weng; Lin e Chiang (2003). 40

Figura 29: Absorção de água. Fonte: Liew et al. (2004). 41
Figura 30: Resistência à compressão. Fonte: Liew et al. (2004). 41
Figura 31. Absorção de água dos corpos-de-prova cerâmicos preparados com argila e lodo.. 42
Figura 32: Absorção de água. Fonte: Adaptado de Araújo (2005)..... 44
Figura 33. Fluxograma de caracterização das matérias-primas..... 46
Figura 34: Fluxograma representativo do procedimento experimental..... 47
Figura 35: Difratograma de raios-x da argila. 55
Figura 36: Difratograma de raios-x do lodo. 56
Figura 37: Análise termogravimétrica (TG) da amostra de argila..... 57
Figura 38: Análise termodiferencial (DTA) da amostra da argila..... 57
Figura 39: Análise termogravimétrica (TG) da amostra de lodo..... 58
Figura 40: Análise termodiferencial (DTA) da amostra de lodo..... 58
Figura 41: Diagrama de Casagrande. 59
Figura 42: Dilatometria da argila e composição argila + 25% de lodo de ETE. 60
Figura 43. Difratograma de raios-x do corpo-de-prova de referência sinterizados a 1.100ºC. 61
Figura 44. Difratograma de raios-x do corpo-de-prova de referência sinterizados a 1.200ºC. 61
Figura 45. Difratograma de raios-x do corpo-de-prova com 25% de lodo sinterizado à 1.100ºC. 62
Figura 46. Difratograma de raios-x do corpo-de-prova com 25% de lodo sinterizado à 1.200ºC. 62
Figura 47: Retração linear de queima..... 63
Figura 48. Corpos-de-prova com adição de 25% de lodo sinterizados a 1.200ºC..... 64
Figura 49: Massa específica aparente..... 64
Figura 50: Absorção de água..... 65
Figura 51: Porosidade aparente. 66
Figura 52: Tensão de ruptura à flexão..... 67
Figura 53: Micrografia MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova com adição de 25% de lodo com aumento de 50x..... 68
Figura 54. Micrografia MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova com adição de 25% de lodo com aumento de 200x..... 68
Figura 55: Micrografia MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova com adição de 25% de lodo com aumento de 1000x..... 69
Figura 56: Micrografia MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova com adição de 25% de lodo com aumento de 2700x..... 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de mercado do setor de cerâmica vermelha no Brasil. 5
Tabela 2: Classificação, contexto geológico e terminologia das matérias-primas argilosas para cerâmica vermelha 7
Tabela 3: Características funcionais das argilas de queima avermelhada, de argilas quaternárias e de bacias sedimentares. 9
Tabela 4. Classificação de resíduos segundo NBR 10.004/2004 10
Tabela 5: Composição de massas cerâmicas em volume 12
Tabela 6: Composição das massas cerâmicas (% em peso) 21
Tabela 7: Composição de amostras realizadas por Teixeira *et al* (2005) 22
Tabela 8: Síntese das fontes de contaminação e efeitos sobre a saúde humana dos metais mais freqüentes no meio ambiente. 32
Tabela 9: Principais efeitos sobre a saúde provenientes de compostos orgânicos tóxicos presentes em biossólidos. 34
Tabela 10: Limites estabelecidos para patógenos pela legislação do Paraná e EUA. 35
Tabela 11: Padrões do CNS para tijolos 38
Tabela 12. Caracterização química de amostras de argila e lodo. 42
Tabela 13. Tensão de ruptura à flexão dos corpos-de-prova sinterizados. 43
Tabela 14. Composições formuladas 43
Tabela 15: Composição química da argila e lodo. 54

LISTA DE SIGLAS

AA	-	Absorção de água
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APL	-	Arranjo Produtivo Local
CEFET-RN	-	Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte
CNS	-	Chinese National Standards
DRX	-	Difração de raios X
DTA	-	Análise térmica diferencial
ETE	-	Estação de Tratamento de Esgoto
FRX	-	Fluorescência de raios X
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICDD	-	International Center for Difraction Data
IP	-	Índice de plasticidade
LL	-	Limite de liquidez
LP	-	Limite de plasticidade
MEA	-	Massa específica aparente
MEV	-	Microscopia eletrônica de varredura
PA	-	Porosidade aparente
PROSAB	-	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
RL	-	Retração linear
TG	-	Análise termogravimétrica
TRF	-	Tensão de ruptura à flexão
UFRN	-	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1 CERÂMICA VERMELHA 4
2.2 RESÍDUOS 10
2.2.1 Classificação dos resíduos 10
2.2.2 Resíduos incorporados à cerâmica vermelha 11
2.3 RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO 25
2.3.1 Resíduos sólidos gerados no tratamento de esgoto 25
2.3.1.1 Material gradeado ou sólidos grosseiros 26
2.3.1.2 Sólidos inorgânicos 26
2.3.1.3 Material flutuante ou escuma 27
2.3.1.4 Lodo 28
2.3.2 Características e produção do lodo de ETE 29
2.3.3 Reciclagem e disposição final dos lodos de esgoto 35
2.3.3.1 Utilização agrícola, florestal e recuperação de áreas degradadas 35
2.3.3.2 Aterros sanitários 36
2.3.3.3 Incineradores 36
2.3.3.4 Disposição oceânica 37
2.3.4 Lodo de estação de tratamento de esgoto incorporado à cerâmica vermelha 37

3 MATERIAIS E MÉTODOS 46
3.1 MATÉRIAS-PRIMAS 47
3.1.1 Homogeneização e quarteamento 48
3.2 CARACTERIZAÇÃO 48
3.2.1 Análise química 48
3.2.2 Análise mineralógica 48
3.2.3 Análise termogravimétrica e termodiferencial 49
3.2.4 Limites de Atterberg 49
3.2.5 Preparação das massas cerâmicas 50
3.2.6 Conformação dos corpos-de-prova 50
3.2.7 Análise dilatométrica 50
3.3 QUEIMA 50

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA QUEIMADOS 51
3.4.1 Retração linear (RL) 51
3.4.2 Massa específica aparente 51
3.4.3 Absorção de água (AA) 52
3.4.4 Porosidade aparente (PA) 52
3.4.5 Tensão de ruptura a flexão (TRF) 53
3.4.6 Análise microestrutural 53

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 54
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS 54
4.1.1 Análise química 54
4.1.2 Análise mineralógica 55
4.1.3 Análise termogravimétrica e termodiferencial 56
4.1.4 Limites de Atterberg 59
4.1.5 Análise dilatométrica 59
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA QUEIMADOS 60
4.2.1 Análise mineralógica 60
4.2.2 Retração Linear de Queima 63
4.2.3 Massa específica aparente 64
4.2.4 Absorção de água 65
4.2.5 Porosidade aparente 65
4.2.6 Tensão de ruptura à flexão 66
4.2.7 Análise microestrutural 67

5 CONCLUSÃO 71

REFERÊNCIAS 73

1 INTRODUÇÃO

Dentre os vários tipos de resíduos produzidos nas estações de tratamento de esgotos (ETE), o lodo é o que apresenta maiores problemas quanto a sua disposição final.

Segundo **Andreoli** e **Pinto (2001)**, o gerenciamento destes resíduos pode representar entre 20 e 60% dos custos operacionais. Ainda assim, o planejamento e a execução do destino final têm sido freqüentemente negligenciados nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil.

De acordo com o **IBGE (2004)**, apenas 40% da população brasileira é atendida por sistemas de coleta de esgotos, o que acarreta uma produção de lodo que **Andreoli e Pinto (2001)** estimam entre 150 e 220 mil toneladas de matéria seca por ano. Este valor tende a aumentar para patamares da ordem de 325 a 473 mil toneladas por ano, se todo o esgoto hoje coletado, fosse integralmente tratado. Dentre as principais formas de disposição do lodo de esgoto destacam-se a incineração, disposição em aterros sanitários e uso agrícola.

De acordo com **Williams (1998)** a incineração do lodo de esgoto gera entre 20% e 50% em peso de cinzas, que permanece como resíduo após a incineração, necessitando, este também, de uma alternativa para disposição final.

A disposição em aterros sanitários, de acordo com **Andreoli e Pinto (2001)**, requer uma série de cuidados especiais, principalmente em relação ao local escolhido, as características de projeto que evitem a percolação da lixívia, a drenagem dos gases gerados e quanto ao tratamento do chorume produzido, além de um projeto operacional eficiente que evite a proliferação de vetores.

De acordo com **Costa et al. (1999)**, a reutilização do lodo para fins agrícolas e florestais vem ganhando força, pois pode ser utilizado na forma de composto orgânico, na forma bruta ou higienizado por caleação, sendo os critérios definidos em função das características do lodo.

Essa forma de disposição, no entanto, sofre restrições em função dos principais contaminantes do lodo: os metais pesados, microorganismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos.

De acordo com **Ingunza et al. (2006)**, a atual taxa de geração de resíduos, acarretada da evolução tecnológica e da crescente demanda populacional, impede a geração de um

equilíbrio hábil entre o consumo e a reciclagem/reuso, gerando problemas de poluição resultantes da gestão inadequada dos resíduos.

Sendo assim, é necessário atingir um novo equilíbrio entre o crescimento das demandas por matérias e energia e a geração de resíduos. Esse equilíbrio, só pode ser alcançado através da viabilização técnica e econômica de modelos de sustentabilidade ambiental, através da reciclagem e do reuso.

Segundo **Ingunza et al. (2006)**, a reciclagem de resíduos é uma prática que vem sendo utilizada de maneira crescente na área de construção civil, reaproveitando resíduos da própria construção civil ou de outras atividades, considerados até então inúteis e problemáticos. A reciclagem pode ser considerada como uma prática ambientalmente correta, diminuindo o consumo de recursos naturais, seja na forma de matérias-primas ou de energia, transformando resíduos em recursos, reduzindo assim os custos com a disposição final dos resíduos.

A indústria de cerâmica é altamente promissora para absorver resíduos sólidos industriais, principalmente por aceitar novos materiais como componentes na matéria-prima (resíduos de mineração, escória de siderurgia, pó de cimento, resíduos de galvanoplastia, lodos industriais, etc.).

De acordo com **Basegio, Berutti e Bergmann (2001)**, a indústria de cerâmica vermelha se destaca no quesito absorção de resíduos como matéria-prima em virtude da heterogeneidade das massas argilosas, constituídas de argilominerais (materiais plásticos) e minerais não argilosos (materiais não plásticos) com ampla variação mineralógica.

A presença de elementos plásticos e não plásticos nas argilas, permite que sejam adicionados resíduos que atuem como plastificantes ou desplastificantes na composição das massas.

Oliveira, Machado e Holanda (2004), destacam ainda que caso os resíduos contenham metais pesados, estes podem ser incorporados à fase vítrea da argila formada durante o processo de ceramização, não retornando para o meio ambiente.

Araújo (2005) caracterizou, em estudos preliminares, amostras de argila provenientes do município de São Gonçalo do Amarante/RN, utilizada na produção de tijolos e um lodo da estação de tratamento de esgoto da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). As matérias-primas foram caracterizadas do ponto vista granulométrico e limites de consistência do solo visando a proposição das misturas, seguida de caracterização química, mineralógica, termogravimétricas e termodiferenciais. Os corpos-de-prova foram extrudados,

queimados nas temperaturas de 950 ºC, 1.000 ºC e 1.100 ºC e submetidos à análises de absorção de água, retração linear e massa específica. Esses resultados apontaram para a possibilidade de incorporação de até 25% em massa de lodo da estação de tratamento de esgoto da UFRN na massa para produção de cerâmica vermelha, com ganhos na plasticidade da massa, em função dos níveis de matéria orgânica presentes no lodo e sua granulometria, com redução da densidade das peças confeccionadas, desde que as propriedades mecânicas não sejam prejudicadas.

Este trabalho propõe estudar as propriedades físicas e mecânicas de corpos-de-prova com adição de 25% em massa de lodo da ETE da UFRN, com composição química diferente da estudada por **Araújo (2005)**, em trabalhos preliminares, visando a sua utilização como matéria-prima para produção de cerâmica vermelha.

As etapas que constituem este trabalho são:

1. Coleta da argila na Cerâmica Samburá, localizada no município de São Gonçalo do Amarante/RN;
2. Coleta do lodo na Estação de Tratamento de Esgoto da UFRN;
3. Caracterização das matérias-primas;
4. Preparação das matérias-primas;
5. Conformação dos corpos-de-prova;
6. Queima dos corpos-de-prova;
7. Caracterização dos produtos queimados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica abrangendo os temas: cerâmica vermelha, matérias-primas para a produção de cerâmica vermelha, formulação de massas e o processamento cerâmico; resíduos, tipos de resíduos, resíduos incorporados à massa para produção de cerâmica vermelha, resíduos de estação de tratamento de esgoto e incorporações de resíduos à massa para fabricação de cerâmica vermelha.

2.1 CERÂMICA VERMELHA

A cerâmica vermelha, ou cerâmica estrutural, é um subgrupo cerâmico caracterizado pela coloração avermelhada de seus produtos e que são empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas), utensílios domésticos e de adorno. Esses produtos são, na quase totalidade, fabricados próximos aos centros consumidores, utilizando matérias-primas locais. A principal matéria-prima para a produção de cerâmica vermelha são as argilas, que possuem alto teor de impurezas, entre as quais destacam-se compostos de baixo ponto de fusão e outros com alto teor de ferro, estes, responsáveis pela coloração vermelha de seus produtos. São caracterizados pela sua boa durabilidade e resistência mecânica, além de possuírem custo muito baixo, tendo as empresas que utilizar grandes áreas e movimentar grandes quantidades de matéria-prima. A queima desses produtos, fabricados a partir de argilas muito impuras, representam grandes desafios ao controle e uniformidade da temperatura de queima. (**ZANDONADI, 1988**)

Como segmento base para a construção civil, o setor de cerâmica vermelha se desenvolveu fortemente no Brasil a partir da década de 1960, impulsionado pela implementação de políticas públicas habitacionais, por meio da criação do Sistema Financeiro da Habitação e do Banco Nacional da Habitação. Durante a década de 1970, sustentado por uma demanda continuada, a construção civil experimentou um novo crescimento, provocando a modernização e expansão da indústria cerâmica nacional. (**CABRAL JUNIOR, 2005**)

O setor de cerâmica vermelha, comparado com outros segmentos da indústria, também é o que possui o maior número de empresas, cerca de 7.000, além de gerar mais empregos. Por

outro lado, é o segmento que gera menor valor agregado e com menor nível de internacionalização (**LIMA; RODRIGUES, 2004**).

A tabela 1 apresenta dados do mercado do setor de cerâmica vermelha no Brasil no ano de 2005.

Tabela 1: Dados de mercado do setor de cerâmica vermelha no Brasil.

Unidades Produtoras	5.500
Empregos diretos	400.000
Produtividade (peças/operário/mês)	13.300
Blocos/Tijolos (milheiro)	48.000.000
Telhas (milheiro)	15.600.000
Faturamento (R$ bilhões)	6,0

Fonte: Ministério de Minas e Energia - Anuário Estatístico (2007).

A estrutura empresarial do setor é bastante diversificada, coexistindo pequenos empreendimentos familiares artesanais (olarias), cerâmicas de pequeno e médio porte com deficiências de mecanização e gestão, e empreendimentos de médio à grande porte (em escala de produção), estas com tecnologia mais avançada, sendo os empreendimentos de grande porte. A grande maioria das empresas tem sua competitividade baseada em custos. No entanto, mais recentemente, uma parcela do setor empresarial vem tomando iniciativas para aprimoramento tecnológico e competitivo, como a adesão em programas de qualidade, implantação de laboratórios de caracterização tecnológica de matérias-primas e de produtos, qualificação de mão-de-obra, desenvolvimento do uso de novos combustíveis, em especial do gás natural, estudos de incorporação de resíduos na massa cerâmica e diversificação da produção (**CABRAL JUNIOR, 2005**).

Em determinadas regiões, essas aglomerações de empresas chegam a constituir arranjos produtivos locais (APLs) de base mineral. As concentrações de empresas, no caso das APLs, podem agregar no mesmo território outros segmentos da cadeia produtiva, como fornecedores de insumos e serviços, além de gerar variados graus de interação entre os agentes empresariais e organismos externos, como governo, associações empresariais, instituições de crédito, ensino e inovação. Esse adensamento da cadeia produtiva de base mineral, associada à interação, cooperação e aprendizado entre seus diversos elos e agentes externos, favorece o incremento da competitividade de todos os negócios associados localmente, com significativos ganhos, em especial ao pequeno e médio empreendedor.

A principal matéria-prima utilizada na produção de cerâmica vermelha são as argilas, também denominadas de argilas comuns (**MOTTA; ZANARDO, CABRAL JUNIOR, 2001**).

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecida com água, certa plasticidade. Sob o ponto de vista físico-químico, as argilas podem ser consideradas sistemas dispersos de minerais nos quais predominam partículas de diâmetro inferiores a 2 μm. Dos pontos de vista químico e mineralógico, as argilas são constituídas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, podendo contar também ferro e magnésio, geralmente cristalinos, denominados argilominerais, podendo conter outros minerais, matéria orgânica e sais solúveis (**ZANDONADI, 1988**).

Em decorrência da constituição do substrato geológico brasileiro, que dispõe de extensas coberturas sedimentares, aliado à evolução geomorfológica, que propiciou a geração de expressivas coberturas residuais intempéricas, os depósitos de argilas para fins cerâmicos possuem ampla distribuição geográfica em todo o território nacional. Segundo o contexto geológico, são distinguidos dois tipos principais de depósitos de argila: argilas quaternárias e argilas de bacias sedimentares.(**CABRAL JUNIOR, 2005**)

A tabela 2 apresenta a classificação, segundo o conceito geológico e a terminologia das matérias-primas argilosas para cerâmica vermelha.

Tabela 2: Classificação, contexto geológico e terminologia das matérias-primas argilosas para cerâmica vermelha

	Classificação	Contexto Geológico e terminologia
Argilas Quaternárias	**Planície Aluvionar**	Argila de queima avermelhada que ocorre no fundo dos vales atuais: Argilas comuns ou para cerâmica vermelha; argilas cauliníticas ou composição mista, vermelhas; argila turfosa; argilas ferruginosas; argilas de várzea, argilas transportadas ou secundárias; argilas de baixo ou de baixio; argila plástica; argila semi-plástica; argila gorda; argila magra; argila, argila siltica, argila arenosa; tabatinga; torba.
	Planície Costeira	Argila de queima avermelhada que ocorre nas planífices costeiras atuais: Argilas comuns ou para cerâmica vermelha; argilas cauliníticas ou de composição mista, vermelhas; argila turfosa; argila de queima vermelha; argilas ferruginosas; argilas transportadas ou secundárias; argilas deltaicas, de estuário; argila mista; argila de baixo ou de baixio; argila plástica; argila semi-plástica; argila gorda; argila magra; argila, argila síltica, argila arenosa.
Argilas de Bacias Sedimentares		Argila de queima avermelhada que ocorre em bacias sedimentares antigas: Taguá (taguá mole, taguá duro); argilas comuns ou para cerâmica vermelha; argilas ilíticas; argilas cauliníticas; argilas de composição mista; argilas calcíticas; folhelho; argilito; siltito; ritmito; varvito; argilas alcalinas; argilas ferruginosas; argilas fundentes; argilas de alteração ou alteritas; argilas residuais; argilas transportadas ou secundárias; argila coluvial; argilas sedimentares; argilas terciárias; argilas fanerozóicas; argilas gondwânicas; argilas marinhas, lacustre, glacial.

Fonte: Cabral Junior et al. (2005)

Na cerâmica vermelha, a formulação das massas é do tipo monocomponente – composta basicamente só por argilas, não envolvendo a mistura de outras substâncias minerais (caulim, filito, rochas feldspáticas, talco e rochas calcárias), a qual é preparada geralmente através da mistura de uma argila "gorda" e de uma argila "magra" (**MOTTA; ZANARDO, CABRAL JUNIOR, 2001**).

As argilas "gordas" apresentam granulometria muito fina, são compostas essencialmente por argilominerais, o que lhes confere grande plasticidade. É necessário uma grande quantidade de água para desenvolver a boa plasticidade dessas argilas, que possuem alta resistência mecânica a seco e após a queima. Os canais internos, existentes entre as partículas, são altamente compactados, o que dificulta a eliminação da água durante o processo de secagem. O gradiente de umidade no interior do produto, provoca retrações diferenciais e deformações, aumentando as perdas no processo produtivo (**PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997**).

As argilas "magras" são ricas em quartzo e são menos plásticas, atuando como desplastificantes nas composições, pois atuam reduzindo o grau de compactação das massas, diminuindo a plasticidade das argilas. Sua introdução nas composições argilosas reduz as contrações sofridas pela massa nos processos de secagem e de queima. Devem apresentar granulometrias superiores a 60 μm e ser utilizadas em quantidades moderadas. Seus principais componentes são as areias, micas, óxido de ferro e outros elementos que atuam como desplastificantes (**PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997**).

A composição da mistura objetiva criar uma massa que atenda algumas funções tecnológicas essenciais (**CABRAL JUNIOR et al. 2005**):

a) **Plasticidade:** propiciar a moldagem das peças;

b) **Resistência mecânica à massa verde e crua**: conferir coesão e solidez às peças moldadas, permitindo a sua trabalhabilidade na fase pré-queima;

c) **Fusibilidade**: favorecer a sinterização e, conseqüentemente, a resistência mecânica e a diminuição da porosidade;

d) **Drenagem**: facilitar a retirada da água e a passagem de gases durante a secagem e queima, evitando trincas e dando rapidez ao processo;

e) **Coloração das peças**: atribuir cores às cerâmicas por meio da presença de corantes naturais (óxidos de ferro e manganês).

A tabela 3 apresenta algumas características funcionais das argilas cerâmicas de queima vermelha para os dois grandes grupos de jazidas brasileiras – quaternárias e bacias sedimentares.

Tabela 3: Características funcionais das argilas de queima avermelhada, de argilas quaternárias e de bacias sedimentares.

Matéria-prima			**Conformação**	**Secagem**		**Queima**		
Tipo de argila		**Minerais Dominantes**	**Moldagem Plástica**	**Velocidade**	**Retração**	**Temperatura e Sinterização**	**Resistência Mecânica**	**Absorção de água**
Quaternária	Plástica "gorda"	Caulinita	Alta e muito boa	Lenta	Alta	Média a alta	Média a baixa	Alta a média
	"Magra"	Caulinita e quartzo	Média a baixa	Rápida	Baixa	Alta	Baixa	Alta
Bacia Sedimentar	Alterada	Caulinita e Ilita	Média a alta	Lenta a média	Alta	Média	Média	Média
	Sã	Ilita	Baixa	Lenta a média	Média a alta	Média a baixa	Alta a média	Baixa a média

Fonte: Cabral Junior et al. (2005)

A granulometria das argilas é um fator importante na determinação da composição das massas, pois interfere diretamente nas propriedades das peças. Quanto maior for a fração de partículas argilosas (menor que 2 μm), maior será a plasticidade e, conseqüentemente, maior será a quantidade de água requerida para dar trabalhabilidade à massa cerâmica, gerando também problemas na secagem e queima dos produtos. Dessa forma, quando a argila é "gorda", acrescenta-se, geralmente, uma argila "magra", com mais impurezas e granulometria maior, que age como desplastificante. O Diagrama de Winkler orienta no estudo da composição granulométrica das massas cerâmicas, ajudando a compor massas cerâmicas com dosagens adequadas de grãos finos (argila), médios (silte) e grossos (areia). (**PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997**)

2.2 RESÍDUOS

Do ponto de vista histórico, o lixo surgiu no dia em que os homens passaram a viver em grupos, fixando-se em determinados lugares e abandonando os hábitos nômades à procura de alimentos ou pastoreando rebanhos (**DIAS, 2000**).

Os resíduos são o resultado de processos de diversas atividades da comunidade e tem origem: industrial, doméstica, hospitalar, agrícola, de serviços e ainda de varrição pública. Os resíduos apresentam-se nos estados sólido, líquido e gasoso (**AMBIENTE BRASIL S/S LTDA., 2008**).

O grande marco na geração de resíduos foi a revolução industrial, entre 1750 e 1850, quando uma grande quantidade de pessoas migrou das zonas rurais para os centros urbanos, acarretando um considerável aumento na geração de resíduos domésticos, aliados aos resíduos industriais gerados pelos recém desenvolvidos processos de produção em massa. Os resíduos gerados eram ricos em vidros quebrados, metal enferrujado, resíduos de alimentos e excrementos humanos, muito perigosos à saúde humana. Dispostos inadequadamente, estes resíduos atraiam moscas, ratos e outros vermes que por sua vez representavam uma ameaça potencial na transmissão de doenças. Este quadro levou a uma crescente conscientização da ligação entre a saúde pública e o meio ambiente (**WILLIAMS, 1998**).

2.2.1 Classificação dos resíduos

Os resíduos podem ser classificados quanto às suas características físicas (seco e molhado), quanto a sua composição química (orgânico e inorgânico), quanto a origem e ainda quanto ao seu estado físico (sólido, líquido ou gasoso) (**AMBIENTE BRASIL S/S LTDA., 2008**).

A NBR 10.004/2004 classifica os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública, de acordo com a tabela 4.

Tabela 4. Classificação de resíduos segundo NBR 10.004/2004

Resíduo Classe I	Perigosos
Resíduos Classe II	Não perigosos
Resíduos Classe II A	Não inertes
Resíduos Classe II B	Inertes

Os resíduos Classe I são aqueles resíduos que representam, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, riscos a saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou aumentando sua incidência, ou ainda aqueles resíduos que promovam riscos ao meio ambiente, quando inadequadamente gerenciados. Esses resíduos podem apresentar algumas destas características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

Os resíduos Classe II, podem ser divididos em Classe II A, Não Inertes, e Classe II B, Inertes. Os resíduos Classe II A, podem apresentar propriedades tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos Classe II B não devem apresentar solubilidade acima dos padrões de potabilidade de nenhum de seus componentes por contato estático ou dinâmico em água destilada ou deionizada em temperatura ambiente, excetuando-se aspectos de turbidez, cor, dureza e sabor.

2.2.2 Resíduos incorporados à cerâmica vermelha

Desde as eras mais remotas, o homem utilizou-se de diversas técnicas para conferir melhor comportamento ao solo, tornando-o mais resistente ao intemperismo, entre as quais cal, palha, diversas outras fibras vegetais, urina e excremento de gado, melaço, goma arábica, gordura de baleia e resinas diversas (**ABIKO, 1983 apud GRANDE, 2003**). Com o intuito de reduzir a demanda por energia dos tijolos crus, muitas substâncias orgânicas foram incorporadas a massa, como serragem, pó de carvão e resíduo de óleos. Após atingir a temperatura de volatilização, a biomassa queima liberando energia e queimando parcialmente os tijolos (**SLIM; WAKEFIELD, 1991 apud WERTHER; OGADA, 1999**).

A indústria de cerâmica vermelha é altamente promissora para absorver os resíduos sólidos industriais, principalmente pelo fato que as massas argilosas utilizadas serem, por natureza heterogêneas. As massas argilosas são materiais poliminerálicos constituídos de argilominerais (materiais plásticos) e minerais não argilosos (materiais não plásticos), com ampla variação mineralógica, física e química, de forma que as massas argilosas para cerâmica vermelha são tolerantes e aceitam a presença de materiais residuais de diversos tipos e origens, mesmo quando adicionados em quantidades significantes (**BASEGIO; BERUTTI; BERGMANN, 2001**).

Caso os resíduos contenham metais pesados, estes podem ser incorporados à fase vítrea da argila formada durante o processo de ceramização e não retornam para o meio ambiente (**OLIVEIRA; MACHADO; HOLANDA, 2004**).

Quintana et al. (1999) estudaram a possibilidade de incorporação de cinza provenientes da queima da casca de arroz na produção de cerâmica vermelha no município de Bagé – RS. Uma olaria da região utiliza casca de arroz como combustível para a queima dos blocos cerâmicos, gerando uma quantidade de cinzas de aproximadamente 1440 m^3/ano, que eram dispostos no meio ambiente sem nenhum cuidado. A olaria utiliza duas argilas para composição da massa cerâmica, uma argila amarela, e uma argila de morro de coloração escura. A tabela 5 apresenta as composições formuladas no estudo.

Tabela 5: Composição de massas cerâmicas em volume

Massa	Composição		
	Argila Amarela (%)	**Argila de Várzea (%)**	**Cinza de Casca de Arroz (%)**
M1	100	-	-
M2	90	-	10
M3	70	20	10

Fonte: Adaptado de Quintana et al. (1999)

Foram confeccionados corpos-de-prova prensados e extrudados, que em seguida a secagem foram queimados nas temperaturas de 800 ºC, 900 ºC, 950 ºC e 1050 ºC.

A figura 1 apresenta os resultados de absorção de água obtidos para todas as composições estudadas.

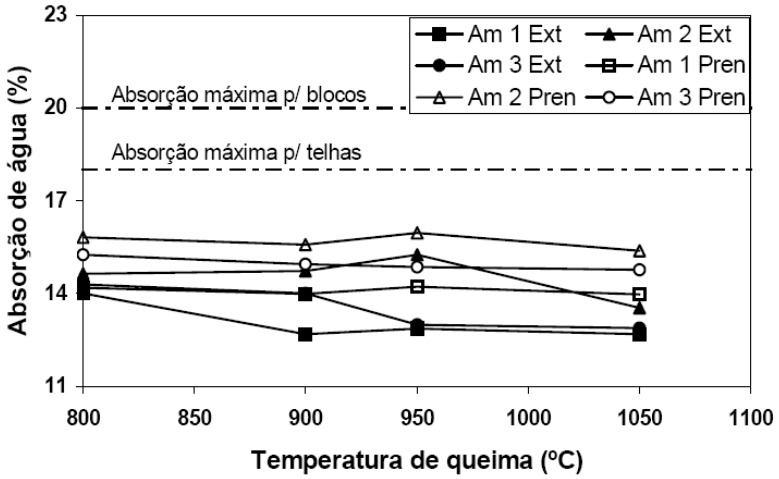


Figura 1: Absorção de água. Fonte: Quintana et al. (1999)

Todos os corpos-de-prova apresentaram valores de absorção de água inferiores ao máximos permitidos para produção de peças cerâmicas.

As figuras 2 e 3 apresentam os resultados de ruptura para os corpos-de-prova prensados e extrudados, respectivamente.

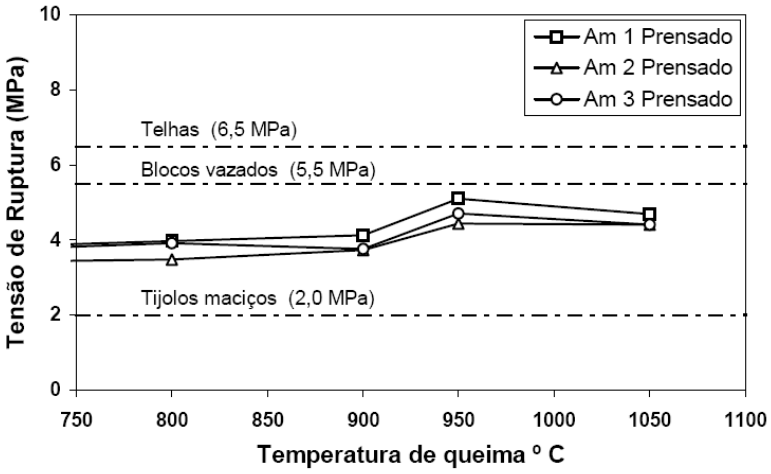


Figura 2: Tensão de ruptura dos corpos-de-prova prensados. Fonte: Quintana et al. (1999)

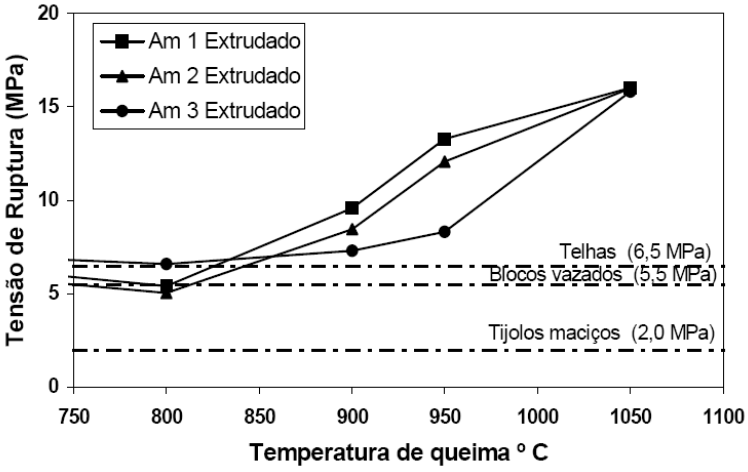


Figura 3: Tensão de ruptura dos corpos-de-prova extrudados. Fonte: Quintana et al. (1999)

Quintana et al. (1999) concluíram que a olaria poderia utilizar até 10% de cinzas de casca de arroz na composição de peças cerâmicas e sugere testes na linha produção com adições de 10% e 20% de cinza com posterior verificação das propriedades tecnológicas das peças produzidas.

Rebmann; Coelho e Salvetti (2001) estudaram a adição do filler de basalto, um pó fino e indesejável gerado na britagem do basalto, na massa de argila utilizada para fabricação de

cerâmica vermelha. Foram coletadas amostras de massa cerâmica, composta por folhelhos argilosos que afloram na região de Rio Verde de Mato Grosso/MS e é utilizado pelas cerâmicas da região para fabricação de tijolos, lajotas e artesanato. O filler de basalto foi extraído da pedreira Financial em Campo Grande/MS.

As amostras foram queimadas nas temperaturas de 1000 ºC, 1100 ºC, 1150 ºC e 1200 ºC.

Os resultados obtidos demonstraram que as propriedades dos corpos-de-prova não foram significativamente alteradas pela inclusão do filler de basalto. Apenas nas temperaturas de 1150 ºC e 1200 ºC, foi possível observar variações mais significativas, em função da fusão do filler.

A figura 4 apresenta os resultados obtidos para o parâmetro de absorção de água.

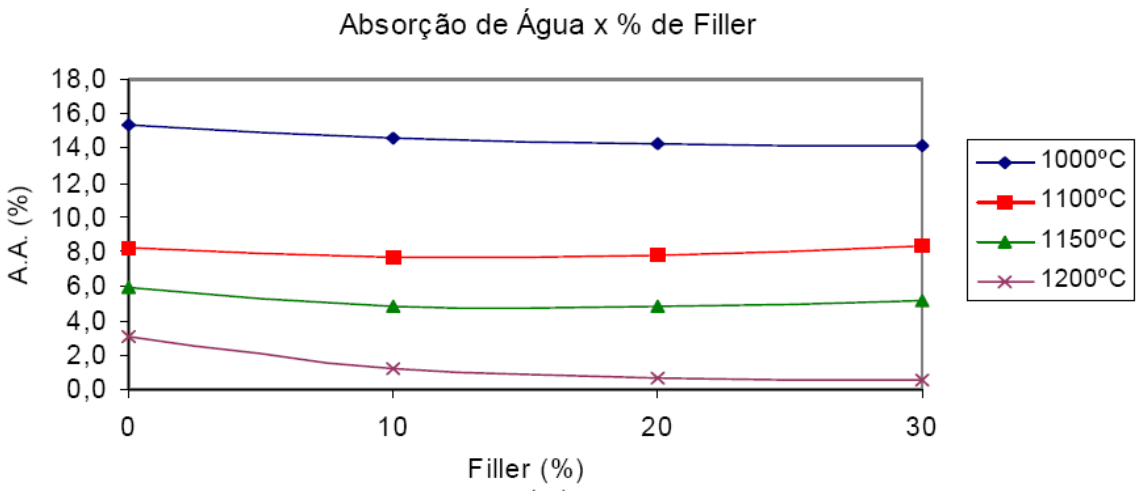


Figura 4: Resultados de absorção em função da composição de filler de basalto. Fonte: Rebmann; Coelho e Salvetti (2001).

Os valores de absorção de água apresentaram-se dentro dos limites recomendados pelas normas e para a temperatura de 1200 ºC, as composições com filler atingiram valores de absorção próximos a zero.

A resistência mecânica não sofreu variações consideráveis, mantendo-se praticamente estável para a mesma faixa de temperatura, mesmo com diferentes composições de filler. A figura 5 apresenta estes resultados.

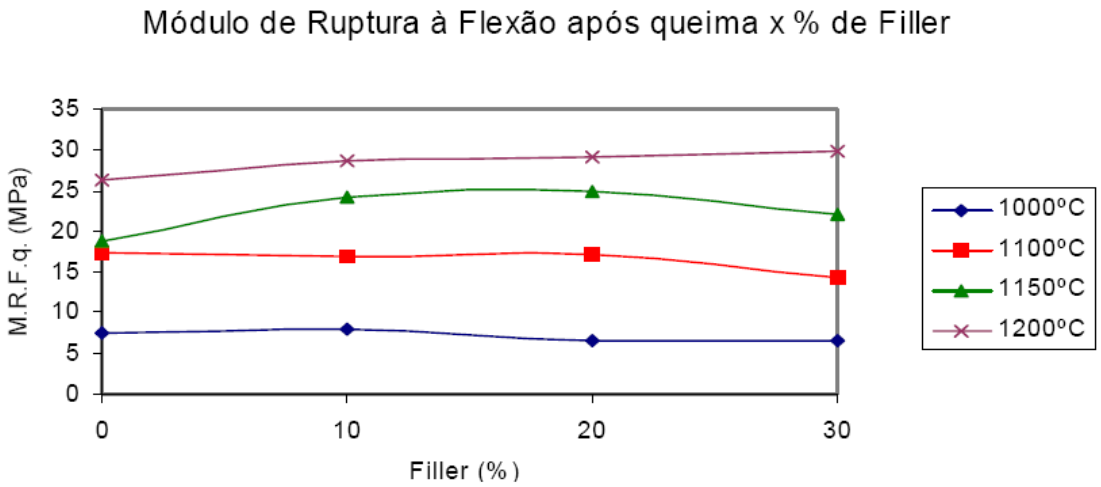


Figura 5: Tensão de ruptura à flexão das massas em função da temperatura de queima e porcentagem de filler de basalto. Fonte: Rebmann; Coelho e Salvetti (2001).

Rebmann; Coelho e Salvetti (2001) concluíram em seu trabalho que em temperaturas de aproximadamente 900 ºC, o filler apresenta propriedades inertes, podendo ser utilizado como enchimento para os produtos de cerâmica vermelha. Em temperaturas superiores a 1100ºC, as propriedades físicas dos produtos cerâmicos podem ser alterados, dependendo da temperatura e da porcentagem de filler empregado.

Santos et al. (2001) compuseram massas cerâmicas com argila e lodo de estação de tratamento de água (ETA), provenientes dos decantadores, em proporções de 10% e 15% de lodo. Os corpos-de-prova foram extrudados, visando aplicação do lodo como matéria-prima para confecção de materiais cerâmicos para a construção civil. Os corpos-de-prova foram queimados a 800 ºC, 850 ºC e 900 ºC e os resultados para absorção de água estão apresentados na figura 6.

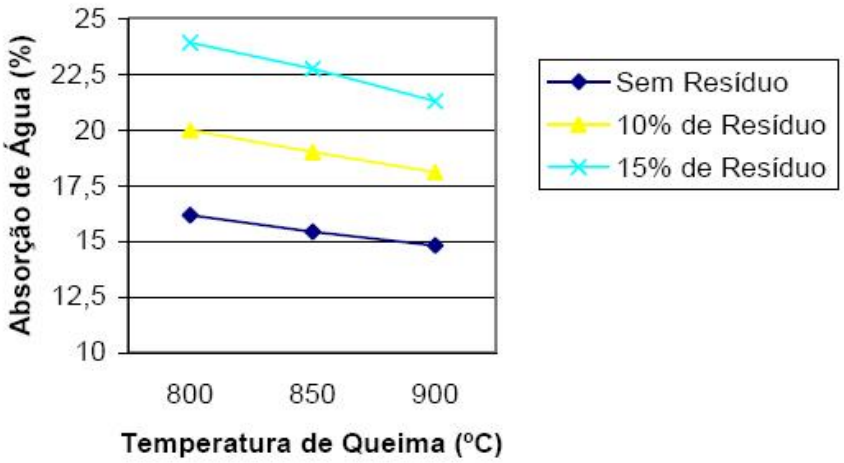


Figura 6: Absorção de água. Fonte: Santos et al. (2001).

Os valores de absorção de água variaram de acordo com os teores de lodo aplicados à massa cerâmica. Todos os corpos-de-prova apresentaram valores de absorção de água inferiores a 25%, máximo permitido para produção de blocos cerâmicos.

Os valores de porosidade aparente estão representados na figura 7.

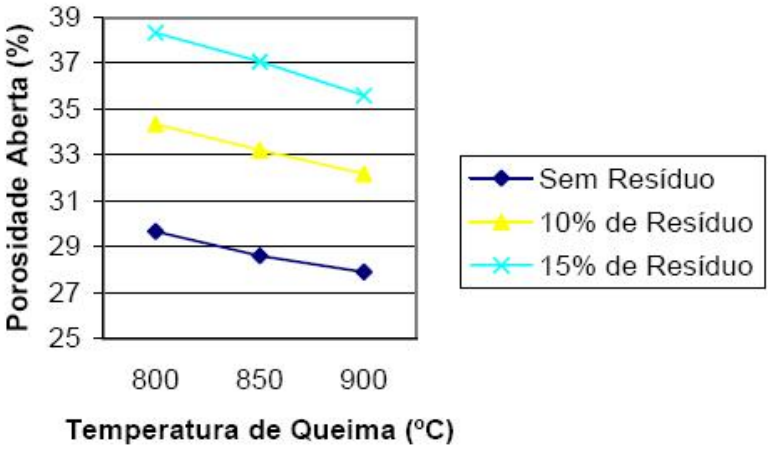


Figura 7: Porosidade aparente. Fonte: Santos et al. (2001).

A porosidade aparente dos corpos-de-prova aumenta com o aumento da quantidade de resíduo incorporado, e decrescem com o aumento da temperatura.

A figura 8 apresenta os resultados dos ensaios de resistência mecânica.

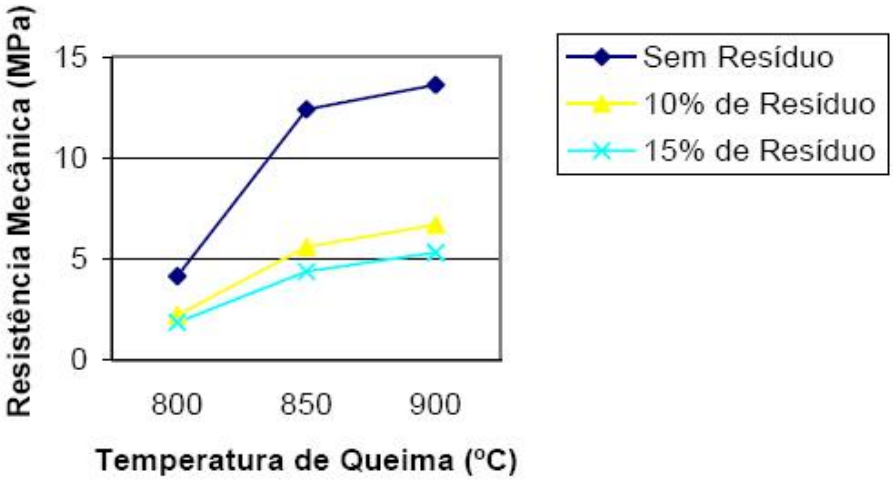


Figura 8: Resistência à flexão. Fonte: Santos et al. (2001).

Os corpos-de-prova poderiam, de acordo com as resistências mecânicas, serem utilizados na produção de blocos, e para teores de 10% e temperatura de queima de 900 ºC, para produção de telhas.

O autor conclui que não houveram transformações significativas no resíduo durante o processo de queima. Apenas dois parâmetros sofreram alterações positivas, como mostrado nas figuras 9 e 10.

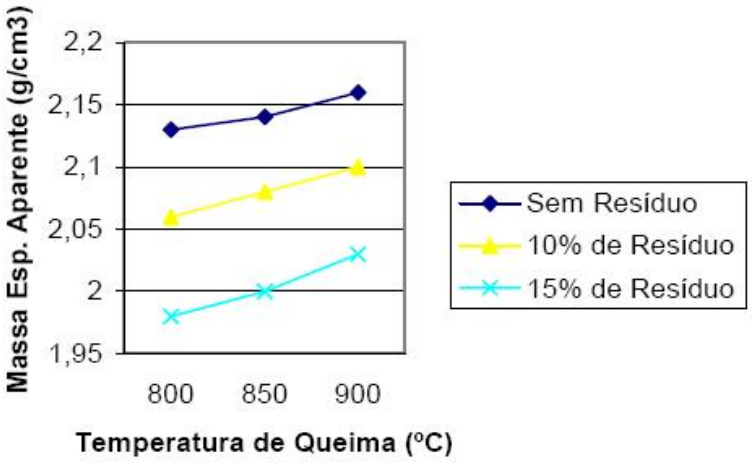


Figura 9: Massa específica aparente. Fonte: Santos et al. (2001).

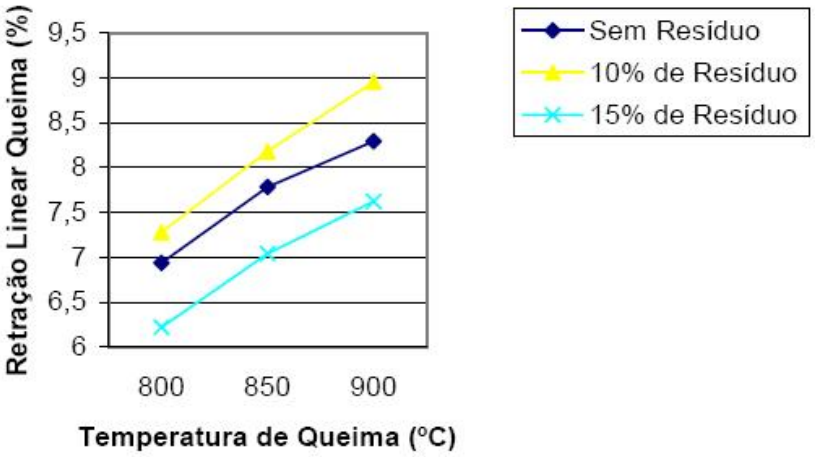


Figura 10: Retração linear de queima. Fonte: Santos et al. (2001).

A incorporação de lodo de estação de tratamento de água causou uma redução na massa específica aparente, para as composições de 10 e 15%, e da retração linear de queima na composição com 15% de resíduo incorporado.

Santos et al. (2001) afirmam que estudos com temperaturas de queima mais elevadas devem ser conduzidos, para tentar obter melhoramentos nas propriedades das misturas propostas.

Ramires (2001) estudou a incorporação de lodo de estação de tratamento de água, proveniente dos decantadores, por prensagem, à massa para produção cerâmica, queimando as peças nas temperaturas de 1000 ºC, 1050 ºC, 1100 ºC e 1150 ºC, com as seguintes proporções de lodo na composição: 5%, 10%, 15% e 20%.

Os resultados apresentaram-se favoráveis, do ponto de vista da absorção de água, para a inclusão do lodo, uma vez que reduziu, em todas as temperaturas estudadas a absorção de água, quando comparada aos corpos-de-prova de referência, como mostra a figura 11.

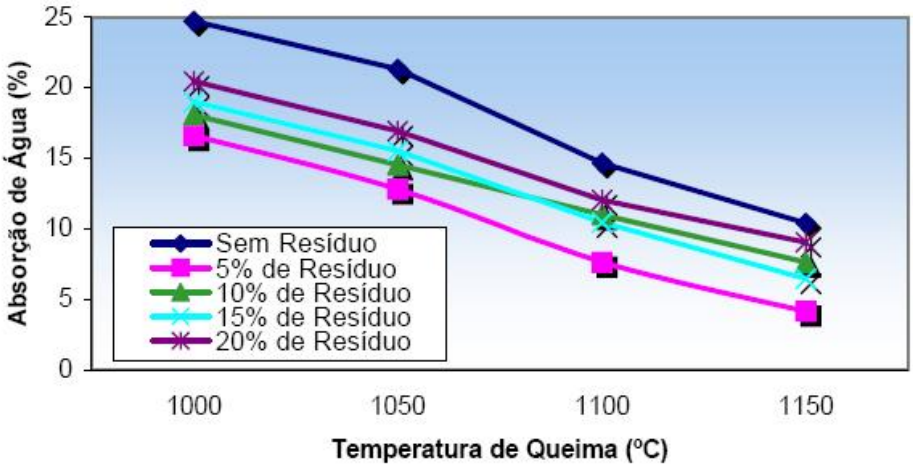


Figura 11: Absorção de água. Fonte: Fonte: Ramires (2001).

Para todas as composições com adição de lodo, foi possível constatar melhorias nessa propriedade, ficando os melhores resultados com as massas compostas por 5% e 10% de lodo.

Pode-se inferir a partir dos valores de retração dos corpos-de-prova, apresentados na figura 12, que os corpos-de-prova com adição de lodo, sejam superiores aos valores dos corpos-de-prova sem resíduo, que estes sofreram maior densificação, o que é corroborado pelos resultados de absorção de água, apresentados na figura 11 e pelos resultados de massa específica aparente, apresentados na figura 13.

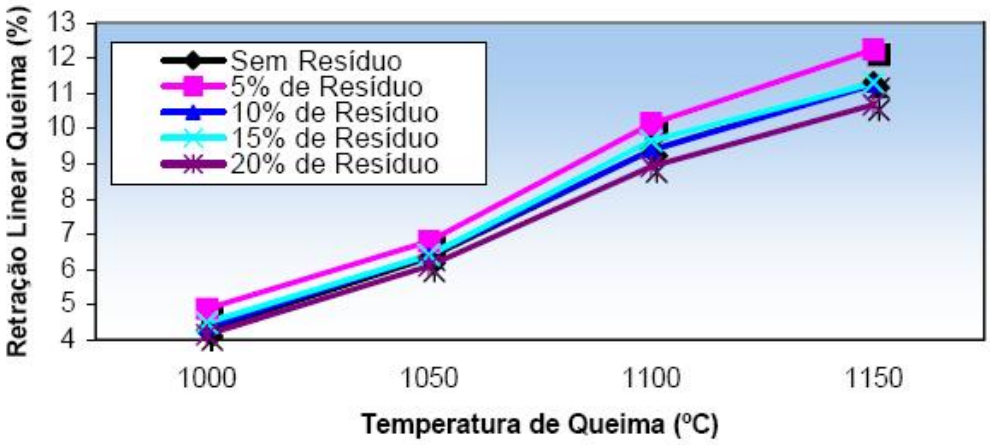


Figura 12: Retração linear de queima. Fonte: Ramires (2001).

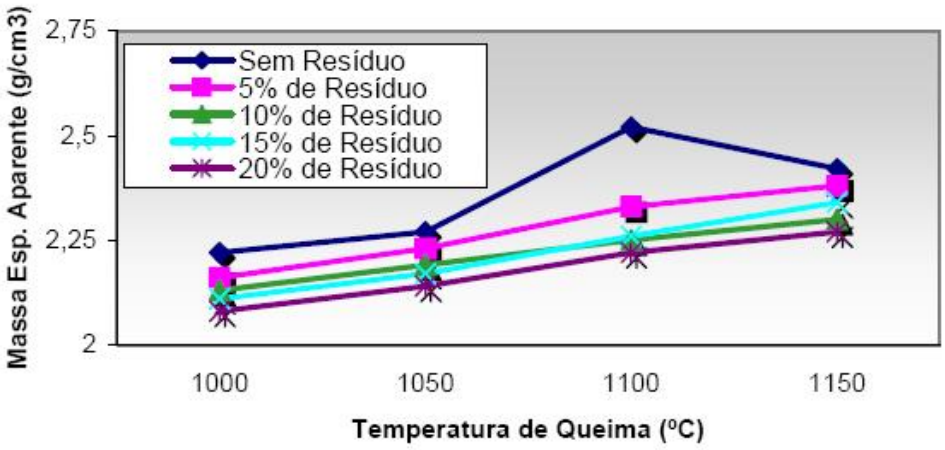


Figura 13: Massa específica aparente. Fonte: Ramires (2001).

A figura 14 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica.

Os corpos-de-prova sofreram uma redução na resistência mecânica, com o aumento da quantidade de lodo incorporado a massa.

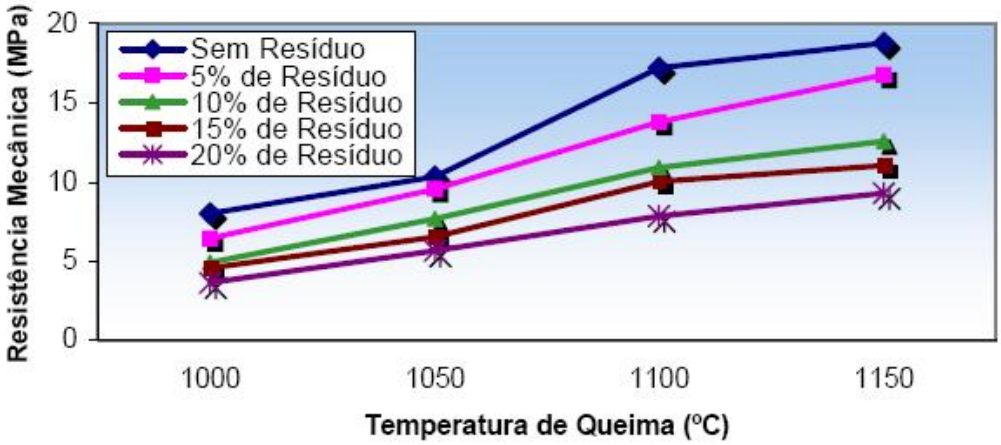


Figura 14: Resistência mecânica. Fonte: Ramires (2001).

Os resultados, de acordo com **Ramires (2001)**, justificam a inclusão do lodo proveniente dos decantadores da estação de tratamento de esgoto de São Leopoldo – RS para a produção de materiais cerâmicos em temperaturas superiores a 1000 ºC.

Vieira et al. (2003) desenvolveram formulações de argila, provenientes da cidade de Campos de Goytacazes – RJ, com adição de resíduo de serragem de granito, proveniente do município de Cachoeira de Itapemirim – ES, visando a melhoria da qualidade das telhas produzidas na região, que em virtude de serem predominantemente cauliníticas, apresentam elevada plasticidade, o que ocasiona defeitos dimensionais nas peças, trincas durante a secagem e a queima, alta absorção de água e baixa resistência mecânica. Além da predominância caulinítica, as argilas da região apresentam também alto teor de hidróxido de alumínio (gibsita), o que confere propriedades refratárias às argilas. O resíduo da serragem de granito atuaria como fonte de material não plástico e de fundentes.

A massa cerâmica industrial, utilizada na produção das telhas em uma das olarias da região, é composta, em proporção, por 70% de argila preta, 20% de argila carolinho e 10% de areia. O resíduo da serragem, na forma de lama, é composta por pó de granito, granalha metálica, cal e água.

As formulações utilizadas estão apresentadas na tabela 6.

Tabela 6: Composição das massas cerâmicas (% em peso)

Massas Cerâmicas	Matérias-primas			
	Argila Carolinho (%)	Argila Preta (%)	Areia (%)	Resíduo de Granito (%)
MI	20	70	10	-
M1	80	-	-	20
M2	45	25	-	30
M3	15	45	-	40

Fonte: **Vieira et al. (2003).**

O comportamento de absorção de água foi reduzido com a adição dos resíduos, embora a retração linear de queima tenha sofrido um aumento com o aumento da temperatura, comportamento devido a vitrificação do material, que é responsável pela densificação do material e retração do material. Embora não tenha havido diferenças significativas entre as massas reformuladas (M1, M2 e M3) e a massa industrial (MI), a massa industrial apresentou queda abrupta no parâmetro absorção de água nas temperaturas de 1050 ºC e 1100 ºC, fato que pode ser atribuído ao elevado percentual de partículas finas e baixo percentual de quartzo. Para todas as formulações, no entanto, valores de absorção de água recomendados para cerâmica vermelha, ou seja, menor que 18%, só foram obtidos em temperaturas superiores a 1000 ºC, como mostra a figura 15.

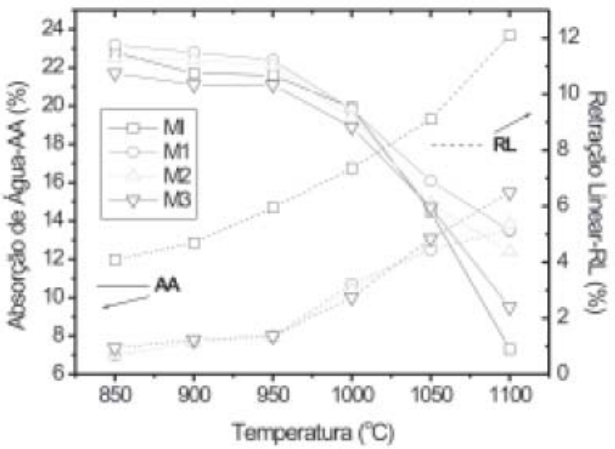


Figura 15: Absorção e retração linear de queima em função da temperatura. Fonte: Vieira et al. (2003)

A composição M3, com 40% de resíduo, apresentou os maiores valores de resistência mecânica em todas as temperaturas de queima. **Vieira et al. (2003)** sugerem que tal

comportamento está associado a concentração de tensões em defeitos microestruturais, como poros, trincas e microfissuras. O gráfico da figura 16 mostra também, que a partir de 900 ºC, a massa M3 já apresenta tensão de ruptura recomendável para a fabricação de telhas.

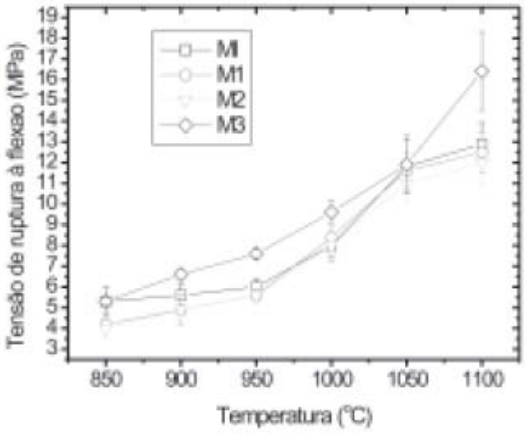


Figura 16: Tensão de ruptura à flexão das massas cerâmicas versus temperatura de queima. Fonte: Vieira et al. (2003)

Vieira et al. (2003) concluíram portanto, que a massa M3 apresentou resultados favoráveis na faixa de temperatura usualmente utilizadas para a produção de telhas, que está compreendida entre 850 ºC e 1000 ºC.

Teixeira et al. (2005) em seu trabalho, formulou duas composições para massa de cerâmica vermelha com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, proveniente de uma usina na região de Presidente Prudente/SP. Além da incorporação da cinzas da cana-de-açúcar, foram estudadas dois diferentes tipos de argila da região e uma mistura das duas argilas, como apresentado no quadro abaixo. A tabela 7 apresenta as composições estudadas.

Tabela 7: Composição de amostras realizadas por Teixeira *et al* (2005)

COMPOSIÇÃO	
I	Barro do Maurício (Taguá)
II	Barro do Martinópolis
III	Tijolo Pronto (Massa Cerâmica)
IV	Martinópolis + 10% de cinzas
V	Martinópolis + 20% de cinzas

Fonte: Modificado de **Teixeira et al. (2005)**

Os corpos-de-prova foram queimados nas temperaturas de 800 ºC, 900 ºC, 1000 ºC e 1100 ºC, com taxa de aquecimento de 10 ºC/min e patamar de queima de 01 hora. As figuras 17, 18, 19, 20 e 21 apresentam os resultados obtidos para os parâmetros massa específica

aparente, retração linear total, absorção de água, porosidade aparente e módulo de resistência a flexão.

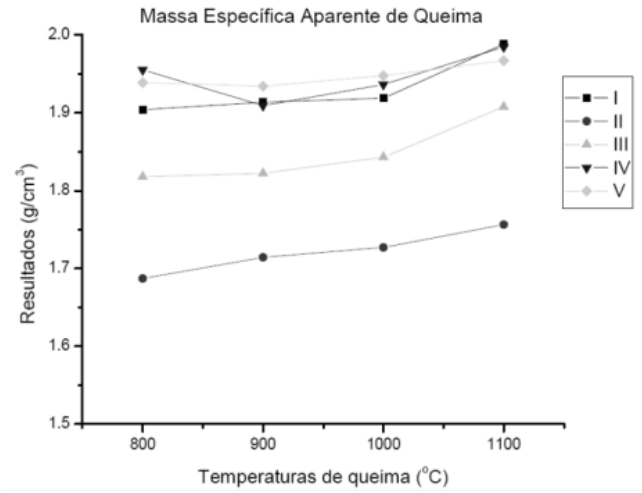


Figura 17: Massa específica aparente de queima. Fonte: Teixeira et al. (2005)

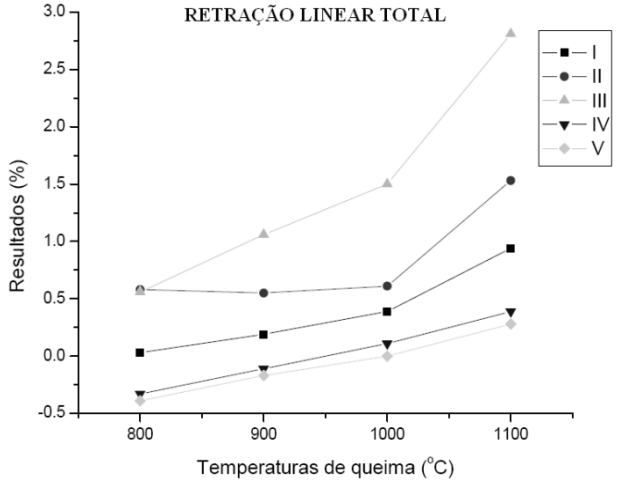


Figura 18: Retração linear total. Fonte: Teixeira et al. (2005)

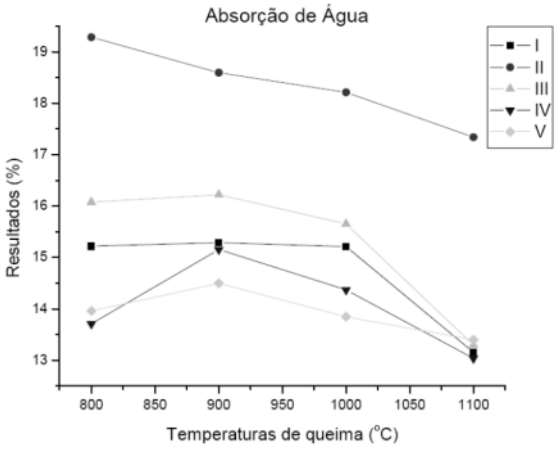


Figura 19: Absorção de água. Fonte: Teixeira et al. (2005)

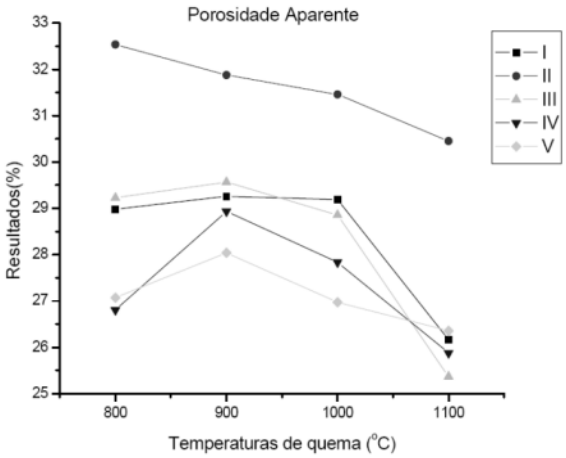


Figura 20: Porosidade aparente. Fonte: Teixeira et al. (2005)

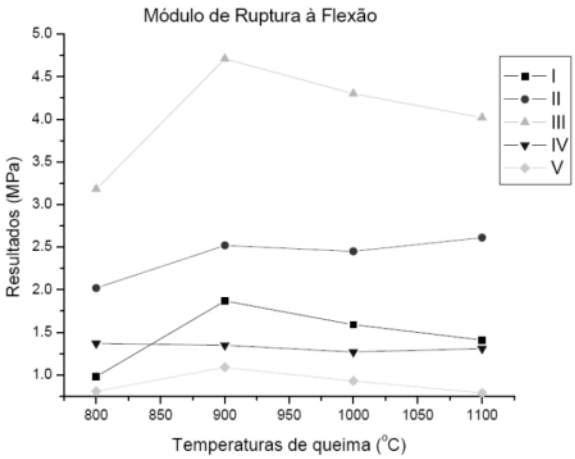


Figura 21: Módulo de ruptura à flexão. Fonte: Teixeira et al. (2005)

Os resultados obtidos por **Teixeira et al. (2005)** apontam para uma maior massa específica aparente da queima, menor retração linear total, menor porosidade aparente e menor absorção d'água. Em 1100 ºC os valores de porosidade aparente e absorção de água se aproximam dos resultados obtidos pelos demais materiais ensaiados. A composição com 10% de cinza de cana-de-açúcar apresentou valores estáveis de resistência mecânica a flexão para todas as temperaturas, já a composição com 20% de cinzas atingiu um valor máximo de 1,09 MPa quando queimados à 900 ºC.

O autor sugere um aprofundamento dos estudos para melhor avaliar os efeitos da incorporação do resíduo em massas cerâmicas.

2.3 RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Grande parte da água distribuída nas edificações transforma-se em esgoto, que tem suas características variando em função dos usos da água, podendo classificar-se em esgotos industriais, domésticos e hospitalares. Os esgotos domésticos contém cerca de 99,9% de água e apenas 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, tendo composição conhecida, com algumas variações em função das características da cidade, do clima, da situação econômica e dos hábitos da população, entre outros fatores (**MOTA, 2006**).

Os esgotos domésticos carreiam dejetos humanos, os quais podem conter microorganismos patogênicos. Os esgotos industriais, além da matéria orgânica, podem carrear ainda, substâncias químicas tóxicas ao homem, animais e ao meio ambiente. A matéria orgânica presente nestes esgotos, quando introduzida nos mananciais, provoca o consumo do oxigênio dissolvido na água, com impactos sobre a vida aquática, sendo necessário a sua coleta e destino adequados, de forma que seja evitada a transmissão de doenças ao homem e minimizados os seus impactos sobre o meio ambiente (**MOTA, 2006**).

O objetivo das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) é a remoção dos principais poluentes presentes nas águas residuárias, adequando-as a uma qualidade desejada ou ao padrão vigente em lei para o seu lançamento nos corpos d'água receptores (**SANTOS, 2003**).

2.3.1 Resíduos sólidos gerados no tratamento de esgoto

No processo de tratamento de esgotos, apenas um subproduto sólido é gerado, o lodo biológico, mas diversos sólidos são retidos em diferentes operações nos sistemas de

tratamento. De acordo com **Haandel** e **Sobrinho (2006)** estes sólidos se compõem dos seguintes tipos: material gradeado ou sólidos grosseiros, sólidos inorgânicos, material flutuante ou escuma e lodo.

2.3.1.1 Material gradeado ou sólidos grosseiros

Consiste no material que não deveria estar na água residuária, mas foi colocado por imperícia ou negligência. O material deve ser retido no tratamento preliminar de gradeamento, de modo a não provocar danos nos equipamentos de bombeamento e pontes giratórias de decantadores, obstruções em tubulações, etc. A figura 22 apresenta a etapa de gradeamento do processo de tratamento de esgoto.

Figura 22: Etapa de gradeamento.

Normalmente a disposição final do material gradeado é o aterro sanitário. No caso do esgoto bruto pode-se esperar em torno de 30 a 90 litros de sólidos grosseiros por 1000 m³ de esgoto.

2.3.1.2 Sólidos inorgânicos

Este material é removido aproveitando-se a diferença de densidade (areia 2,65 kg/l, orgânicos 1 a 1,1 kg/m³), o que permite a separação por sedimentação simples em uma caixa de areia ou usando um ciclone. A sua remoção se torna importante por duas razões:

a) Se a areia for acumulada no sistema de tratamento, o assoreamento poderá, rapidamente, provocar sérios problemas operacionais e eventualmente inviabilizar seu funcionamento;

b) O material é extremamente abrasivo, sendo necessário a sua remoção de modo a não provocar desgastes nos equipamentos mecânicos.

A figura 23 apresenta a etapa de desareamento de uma ETE.

Figura 23: Desareamento.

Normalmente a disposição final da areia é feita em aterro sanitário. Em esgoto bruto espera-se a faixa de 20 a 60 litros de areia para cada 1000 m³, dependendo de vários fatores, entre outros a qualidade da rede de esgoto (introdução de água pluvial com arraste de sólidos de ruas).

2.3.1.3 Material flutuante ou escuma

São compostos por materiais com densidade menor que a água como óleos, graxas, plástico, papel, resíduos de alimentos, etc. Este material é retirado através de raspagem superficial dos decantadores e da superfície de câmaras de gás de reatores anaeróbicos e é encaminhado por bombas para outros métodos de tratamento ou disposição como aterro sanitário, digestor anaeróbico, etc. A quantidade de material flutuante é pequena (3 a 12 kg/1000 m³ de esgoto), mas pode ter um efeito negativo sobre o funcionamento de processos biológicos, notadamente a digestão anaeróbica.

A figura 24 apresenta a remoção do material flutuante de uma ETE.

Figura 24: Remoção de escuma.

2.3.1.4 Lodo

Lodo é o termo utilizado para designar os sólidos orgânicos gerados durante o processo de tratamento de esgoto. Distingue-se, lodo primário (material sedimentável no esgoto bruto) gerado nos processos de tratamento primários e lodo secundário, produzido nos sistemas de tratamento biológico. Estes materiais têm alto teor de material orgânico, nitrogênio e fósforo e, a princípio, podem ser utilizados como fertilizantes na agricultura após tratamento adequado.

A figura 25 apresenta uma lagoa de estabilização onde é formado o lodo secundário, em uma ETE.

Figura 25: Lagoa de estabilização.

Embora o lodo das ETEs, na maior parte dos processos de tratamento corresponda a 95% de água, por convenção ele é denominado fase sólida, distinguindo-se do fluxo do líquido em tratamento. Esse lodo é o principal resíduo sólido gerado no processo de tratamento de esgotos em termos de volume e importância (**SANTOS, 2003**).

A complexidade na gestão do lodo das ETEs é refletida nos custos operacionais das estações de tratamento, podendo representar algo entre 20 e 60% dos custos operacionais. Ainda assim, o planejamento e a execução do destino final têm sido freqüentemente negligenciados nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil (**ANDREOLI; PINTO, 2001**).

O tema é tão complexo que ganhou destaque na Agenda 21, onde no capítulo 21, que trata da disposição final de resíduos do saneamento, recomenda:

a) Redução da produção do resíduo;

b) Alternativas de reuso;

c) Reciclagem;

d) Adoção de medidas de disposição final.

2.3.2 Características e produção do lodo de ETE

Uma das finalidades do tratamento de esgoto doméstico é a remoção do material orgânico, que, quase invariavelmente é feito por processos biológicos, por serem mais baratos e confiáveis que outros processos. As bactérias heterotróficas, na maioria das vezes, são as responsáveis, nesses sistemas, pela decomposição e estabilização do material orgânico, utilizando-o tanto como fonte material quanto de energia (**HAANDEL; SOBRINHO, 2006**).

Quando a bactéria usa o material orgânico como fonte de material, este é transformado em massa celular, num processo chamado anabolismo ou assimilação. Por não ocorrer de forma espontânea, o anabolismo depende da disponibilidade de energia química da bactéria. Quando a bactéria transforma material orgânico em produtos estabilizados essa energia é liberada. O tipo de bactéria e o do ambiente prevalecente no sistema de tratamento é quem determina a natureza dos produtos estabilizados. Este processo é chamado catabolismo ou dissimilação (**ANDREOLI; PINTO, 2001**).

Quanto ao catabolismo, distinguem-se dois processos fundamentalmente diferentes: o processo oxidativo e o fermentativo. No processo oxidativo o material orgânico é oxidado por um oxidante extracelular presente no sistema de tratamento e seus produtos são compostos inorgânicos estáveis, sendo o dióxido de carbono e a água os mais importantes. Os oxidantes mais comumente encontrados nos sistemas biológicos de tratamento de esgotos são o oxigênio, nitrato e sulfato (**HAANDEL; SOBRINHO, 2006**).

O lodo biológico em excesso, compreende a biomassa de microorganismos aeróbios gerada a partir da matéria orgânica dos esgotos. A entrada continua de matéria orgânica nos reatores biológicos proporciona o crescimento constante da massa. A mesma quantidade de massa de sólidos biológicos gerada deve ser removida do sistema para preservar o equilíbrio. Caso o tempo de permanência dos sólidos no sistema seja baixo e haja satisfatória disponibilidade de alimento, os sólidos biológicos conterão maiores teores de matéria orgânica em sua composição celular. Estes sólidos não se encontram estabilizados (digeridos), necessitando de uma etapa posterior e separada de digestão. De outra forma, os lodos emanariam maus odores durante seu tratamento e disposição final, em virtude da decomposição anaeróbica da matéria orgânica em condições não controladas (**SANTOS, 2003**).

Da mesma forma que alguns componentes orgânicos e minerais conferem características benéficas ao lodo, outros podem ser indesejáveis do ponto de vista sanitário e ambiental. Os principais elementos, que concentram-se ao longo do processo de tratamento do esgoto, em proporções variáveis, são os metais pesados, microorganismos patogênicos e poluentes orgânicos.

A presença destes elementos no esgoto é função da qualidade do esgoto bruto e do sistema de tratamento. Os lodos podem ser desinfectados através de diversos processos de higienização, reduzindo seus níveis de agentes patogênicos. Os poluentes orgânicos e metais pesados, requerem métodos de tratamento considerados economicamente inviáveis, sendo a melhor estratégia evitar tal contaminação (**SANTOS, 2003**).

Os metais pesados são os elementos que possuem massa específica maior do que 6,0 g/cm³. O termo “metal pesado” é usado para designar os elementos químicos que contaminam o meio ambiente e podem provocar diferentes níveis à biota. Os principais elementos químicos que se encontram neste conceito são: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn. Tais elementos são encontrados naturalmente nos solos, porém, em concentrações inferiores àquelas consideradas tóxicas aos seres vivos. Alguns deles são necessários aos

organismos vivos, como o As, Co, Cr, Cu, Se e Zn. Acima de determinadas concentrações limites, esses elementos tornam-se tóxicos. Já elementos como Pb, Hg e Cd, não existem naturalmente em organismos vivos e a sua presença é prejudicial em qualquer concentração (**SANTOS, 2003**).

Os níveis de metais pesados nos solos, geralmente baixos, podem ser consideravelmente aumentados pelo emprego de fungicidas, fertilizantes minerais e esterco de animais na agricultura e o descarte de resíduos sólidos urbanos, tais como lixo e lodo de esgoto e industriais no solo (**PROSAB, 1999**).

A presença desses metais está associada ao lançamento de despejos nas redes coletoras públicas por partes das indústrias de galvanoplastia, formulação de compostos orgânicos e inorgânicos, cortumes, farmacêutica, fundição, lavanderias, petróleo e formação de corantes e pigmentos (**SANTOS, 2003)**.

A tabela 8 apresenta uma síntese entre as fontes de contaminação dos principais metais pesados, assim como os seus efeitos para a saúde humana.

Tabela 8: Síntese das fontes de contaminação e efeitos sobre a saúde humana dos metais mais freqüentes no meio ambiente.

Metal	Fonte de Contaminação	Efeitos sobra a saúde
Alumínio	Água, queijos fundidos, farinha branca de trigo, panelas de alumínio, embalagem de papel alumínio, cosméticos, anti-ácidos, pesticidas e antiperspirante, fermento de pão, sal.	Constipação intestinal, perda de energia, cólicas abdominais, hiperatividade infantil, perda de memória, dificuldade de aprendizado, osteoporose, raquitismo e convulsões. Doenças relacionadas: Alzheimer e Parkinson.
Arsênio	Óleos combustíveis, pesticidas e herbicidas, metalúrgicas, plantas marinhas e frutos do mar.	Transtornos gastrointestinais, espasmos músculo-vicerais, náuseas, diarréias, inflamações da boca e garganta, dores abdominais.
Bário	Água poluída, agrotóxicos, pesticidas e fertilizantes.	Hipertensão arterial, doenças cardiovasculares, fadiga e desânimo.
Cádmio	Cigarros, farinha refinadas, materiais odontológicos, indústria de aço, efluentes gasosos industriais, fertilizantes, pesticidas, fungicidas, café e chá tratados com agrotóxicos, materiais cerâmicos, frutos do mar, farinha de osso, solda, fundição e refinação de metais como zinco, chumbo e cobre. Derivados de cádmio são usados em pigmentos em pintura, baterias, processos de galvanoplastia, acumuladores, estabilizadores de pvc, reatores nucleares.	Metal cancerígeno, provoca elevação da pressão sanguínea e aumento do coração. Queda da imunidade. Aumento da próstata. Enfraquecimento ósseo. Dores nas articulações. Anemia. Enfizema pulmonar. Osteoporose. Perda de olfato. Perda do desempenho sexual.
Chumbo	Baterias de automóveis, tintas, combustíveis, vegetais tratados com agrotóxicos, fígado bovino, alimentos enlatados, cigarros, pesticidas, tinturas de cabelo gás contendo chumbo, papel de jornal e anúncios coloridos, fertilizantes, cosméticos, cigarros, poluição do ar.	Irritabilidade e agressividade, indisposição, dores de cabeça, convulsões, fadiga, sangramento gengival, dores abdominais, náuseas, fraqueza muscular, abnubilação mental, perda de memórias, insônia, pesadelos, acidente vascular inespecífico, alterações de inteligência, osteoporose, doenças renais, anemias, problemas de coagulação. Afeta o sangue, os rins, sistema digestivo e reprodutor. Agente teratogênico (provoca alterações genéticas).
Cromo	Curtição de couro e galvanoplastia.	Dermatites, úlceras cutâneas, inflamação nasal, câncer de pulmão e perfuração do septo nasal.
Mercúrio	Termômetros, pesticidas e agrotóxicos, amálgama dentário, água, garimpos, polidores, jóias, ceras, tintas, tomates e pescado contaminados, açúcar, explosivos, lâmpadas fluorescentes de mercúrio, cosméticos, produção e entrega de produtos derivados de petróleo, células de eletrólise do sal para produção do cloro.	Depressão, fadiga, tremores, síndrome do pânico, parestesias, descontrole motor, andar lateral, dificuldade de fala, perda de memória, perda do desempenho sexual, estomatite, dentes soltos, dor e paralisia de extremidades, dor de cabeça, anorexia em crianças, alucinações, vômitos, dificuldades de mastigação, sudorese e perda do senso de dor.
Níquel	Utensílios de cozinha, baterias níquel-cádmio, jóias, cosméticos, óleos hidrogenados, permanentes (cabelo) à frio.	Metal cancerígeno, pode causar: dermatite de contato, gengivites, erupções da pele, estomatite, tonturas, dores articulares, osteoporose e fadiga crônica.
Zinco	Metalurgia (fundição e refinação), indústrias recicladoras de chumbo.	Sensação como paladar adocicado e secura na garganta, tosse, fraqueza, dor generalizada, arrepios, febre, náusea, vômito.

Fonte: **SANTOS (2003)**.

De todos os processos para desinfecção do lodo de ETE, o que tem apresentado maior eficiência é o processo de compostagem, devido a atividade microbiológica intensa durante o processo, ocasionada pelo desenvolvimento de uma população de microorganismos termófilos já no início do processo, o que mantém a temperatura elevada já nos primeiros dias. No entanto, não se deve negligenciar as análises aprofundadas dos níveis de contaminação dos lodos, dos processos de desinfecção do mesmo e dos componentes no solo, especialmente em relação aos ovos de helmintos, pois são os que apresentam maior tempo de sobrevivência no solo, cerca de 14 anos.

Outro contaminante dos lodos são os compostos orgânicos tóxicos, que podem estar presentes no lodo devido aos seguintes fatores:

- Doméstica: restos de solventes, pinturas, detergentes;
- Efluentes industriais: indústrias químicas em geral;
- Águas pluviais: infiltram-se na rede coletora de esgoto, carreando resíduos de produtos utilizados em veículos automotores, pesticidas, etc.

O impacto dos compostos orgânicos sobre a saúde e do meio ambiente é função do nível de contaminação, da taxa em que são acumulados nos grãos e plantas e da biodisponibilidade.

Ingunza et al. (2007) determinou que o lodo da ETE UFRN apresentava níveis médios de bactérias *Escherichia coli*/100 ml que o enquadra como não apresentando riscos sanitários, porém, a sua manipulação ainda requer o emprego de luvas e a adoção de práticas de higiene pessoal, com vistas a minimizar ainda mais os riscos à saúde.

A tabela 9 apresenta alguns dos efeitos sobre a saúde dos principais compostos orgânicos tóxicos presentes em biossólidos.

Tabela 9: Principais efeitos sobre a saúde provenientes de compostos orgânicos tóxicos presentes em biossólidos.

COMPOSTOS ORGÂNICOS TÓXICOS	EFEITOS SOBRE A SAÚDE
Aldrin e Dieldrin	Afetam o sistema nervoso central. Em doses altas é fatal para o homem.
Benzeno	A exposição aguda ocasiona a depressão no sistema nervoso central. Estudos sugerem que existe uma relação entre a exposição ao benzeno e a leucemia.
Clordano	Provoca vômitos e convulsões. Pode causar mutações.
Lindano	Causa irritação do sistema nervoso central, náuse, vômitos, dores musculares e respiração debilitada.
Clorofórmio	Severamente tóxico em altas concentrações; danos ao fígado e ao coração. Cancerígeno a roedores.
PCB	Provavelmente cancerígeno; exposição ao mesmo resulta em dores de cabeça e distúrbios visuais.
DDT	Causa problemas, principalmente no sistema nervoso central, causa decréscimo das células brancas do sangue e acumula-se nos tecidos gordurosos.

Fonte: **PROSAB (1999)**.

A disposição do lodo é regulamentada por normas técnicas que estabelecem critérios baseados no risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente. Estas normas também estabelecem que o lodo pode ser utilizado na agricultura, mas deve antes ser higienizado por processos que eliminem ou reduzam significantemente o teor de organismos patogênicos, tornando o produto final biologicamente inerte de acordo com a aplicação desejada. O controle deve ser utilizado com o monitoramente de três espécies de patógenos: *Salmonella spp.*, vírus entéricos e ovos viáveis de helmintos, além da utilização de um indicador bacteriano de contaminação, que são os coliformes fecais. Tanto os EUA quanto o Paraná especificam critérios para classificação do lodo de acordo com as características sanitárias e o uso agrícola do material, como especificados na tabela 10.

Tabela 10: Limites estabelecidos para patógenos pela legislação do Paraná e EUA.

LEGISLAÇÃO DO PARANÁ		
Microorganismos/Classe	**Lodo Classe A**	**Lodo Classe B**
Ovos de helmintos	Até 50 ovos / 100g massa seca	Até 100 ovos / 100g massa seca
Salmonella spp.	Ausente	Ausente
Estreptococos fecais	< 10^3 / 100g massa seca	< 10^6 / 100g massa seca
Coliformes fecais	< 10^3 / 100g massa seca	< 10^6 / 100g massa seca
Culturas	Milho, feijão, soja, ou seja, grandes culturas mecanizadas sem contato primário.	Espécies florestais e frutíferas em sistema de cova.
LEGISLAÇÃO DOS EUA		
Microorganismos/Classe	**Lodo Classe A**	**Lodo Classe B**
Ovos viáveis de helmintos	< 1 / 4g massa seca	Não especificado
Salmonella spp.	< 3 / 4g massa seca	Não especificado
Coliformes fecais	< 10^3 / g massa seca	< $2x10^6$ / g massa seca
Vírus entéricos	< 1 / 4 g massa seca	Não especificado
Culturas	Pode ser aplicado em terrenos de praças, jardins e pastagens.	Pode ser utilizado na agricultura com algumas restrições.

Fonte: **GONÇALVEZ; LIMA; PASSAMANI, 1999**.

2.3.3 Reciclagem e disposição final dos lodos de esgoto

Dentre as principais opções de disposição final do lodo das estações de tratamento de esgotos, podemos citar: utilização agrícola e florestal, recuperação de áreas degradadas, aterros sanitários, incineração e disposição oceânica.

2.3.3.1 Utilização agrícola, florestal e recuperação de áreas degradadas

A reutilização do lodo para fins agrícolas e florestais surge como uma opção interessante. O lodo pode ser utilizado na forma de composto orgânico, na forma bruta ou higienizado por caleação, sendo os critérios de seleção para o uso definidos em função das características do lodo, do tipo de solo e da cultura (**COSTA et al. 1999**).

Além de ser uma ótima fonte de matéria orgânica, o lodo apresenta normalmente um maior teor de nitrogênio em base de peso seco do que o esterco de bovinos e aves. A principal função do lodo como fonte de matéria orgânica é atribuída aos benefícios que apresenta quando da sua decomposição no solo formando o húmus, que apresenta os benefícios tais como solubilização de nutrientes; alta capacidade de troca catiônica (Ca, Mg, K, Na, H e NH_4), fornecimento lento de fósforo, nitrogênio, enxofre e micronutrientes, aumenta a capacidade de retenção de umidade no solo e melhora a estrutura e capacidade tampão do solo tornando-o mais resistentes às ações da erosão (**COSTA et al. 1999**).

A adubação orgânica favorece a formação de grânulos que tornarão o solo poroso e permeável, facilitando a adsorção e a retenção de água e nutrientes. Por outro lado, os solos arenosos, que são bastante porosos e soltos, de fácil adsorção de ar e água, são pouco resistentes e não apresentam capacidade de retenção de água e nutrientes minerais, mas a aplicação do lodo como fonte de matéria orgânica favorece a sua firmeza, fertilidade e resistência a lixiviação (**COSTA et al. 1999**).

2.3.3.2 Aterros sanitários

O aterro sanitário constitui uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, que busca evitar danos à saúde pública e a minimização dos impactos ambientais. É operacionalizado pelo confinamento dos resíduos na menor área possível e intercalando-os com camadas de terra como cobertura. Nesta modalidade de disposição, não há o interesse em aproveitar os nutrientes do lodo, que é confinado em células e sofre o processo de biodegradação anaeróbia, gerando vários subprodutos, entre eles o metano e o chorume. Existem duas modalidades de disposição:

a) **Aterro sanitário exclusivo**: que recebe apenas lodo. O teor de sólidos deve ser superior a 30% ou mesmo seco termicamente;

b) **Có-disposição com resíduos sólidos urbanos**: nesta modalidade o lodo é misturado com os resíduos sólidos urbanos.

A mistura do lodo com os resíduos urbanos acelera o processo de biodegradação, mas reduz a vida útil do aterro caso a quantidade de lodo disposta seja significativa.

Segundo a NBR 10.004 (**ABNT, 2004**), o lodo é classificado como Classe II, não inertes, mas contaminação por efluentes industriais pode mudar suas características para Classe I, perigosos, e exigir aterros especiais.

2.3.3.3 Incineradores

O processo de incineração é o processo de estabilização do lodo que oferece maior redução do volume para disposição final. O volume de cinzas é da ordem de 4% do volume de lodo desidrato que entra no incinerador. Durante a incineração, as substâncias orgânicas presentes são destruídas pela combustão, na presença de excesso de oxigênio. Devido o elevado teor de matéria orgânica, o processo de combustão só atinge condições autógenas

quando o teor de sólidos é superior a 35%. O poder calorífico do lodo é fundamental na redução do consumo de combustível. Os elementos combustíveis do lodo são carbono, enxofre e hidrogênio, que existem no lodo na forma de gordura, carboidratos e proteínas. Os produtos da combustão completa do lodo são o vapor d'água, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e cinza inerte (**SANTOS, 2003**).

Os riscos de disposição da cinza estão vinculados a possível lixiviação dos metais, o que torna desaconselhável a sua utilização no solo, sendo mais recomendado a sua disposição em aterros sanitários (**SANTOS, 2003**).

2.3.3.4 Disposição oceânica

A disposição oceânica foi muito comum nos países e cidades costeiras, mas 1972, durante a Conferência de Stockholm, vários países foram estimulados a controlar a disposição de resíduos nos oceanos pela implementação de novas leis. As Nações Unidas se reuniram em Londres após as recomendações da Conferência de Stockholm e iniciaram a *Convention on the Marine Pollution y Dumping of Wastes and Other Matter*, que foi implementado em 1975. A Organização Marítima Internacional foi responsável por está convenção e um Protocolo foi finalmente adotado em 1996, um passo importante na regulamentação da disposição oceânica (**MARINE BIO, 2008**).

A disposição oceânica dos lodos é mais barata, principalmente se este estiver contaminado por produtos químicos. As diretrizes das Nações Unidas determinam que se o lodo não tiver contaminantes suficientes para causar eutrofisação ou por em risco a saúde humana, ele é passível de disposição oceânica. O pico de disposição oceânica de lodo foi de 18 milhões de toneladas em 1980, um número que foi reduzido para 12 milhões de toneladas nos anos de 1990 (**MARINE BIO, 2008**).

Atualmente, os países estão reduzindo a quantidade de resíduos dispostos nos oceanos, em detrimento a técnicas de disposição como uso agrícola e incineração (**WILLIAMS, 1998**).

2.3.4 Lodo de estação de tratamento de esgoto incorporado à cerâmica vermelha

De acordo com **Slim e Wakefield (1991) apud Werther e Ogada (1999)**, no município de Port Elizabeth, África do Sul, 45 t/d de lodo de uma planta de tratamento de esgoto, termicamente condicionado e desaguado por centrifugação, é completamente utilizado na

produção de tijolos a 15 km de distância. O lodo é misturado em proporção de 30% em volume à argila para produção de tijolos comuns. As resistências a compressão reportadas para estes tijolos é de 38 MPa, quando as normas do South African Bureau of Standards, requerem no mínimo 14 MPa. Os valores de absorção de água giram em torno de 13%, uma média 30% maior que os tijolos produzidos sem lodo. A porosidade dos tijolos ajuda na adição da argamassa, não se configurando como um problema.

Em Taiwan, **Weng; Lin e Chiang (2003)** estudaram a incorporação de lodos de estações de tratamento de esgotos industriais na produção de tijolos.

A tabela 11 apresenta os parâmetros de comparação utilizados por **Weng; Lin e Chiang (2003)**, de acordo com os Padrões Nacionais Chineses (CNS).

Tabela 11: Padrões do CNS para tijolos

Parâmetro	Tijolo Classe 1	Tijolo Classe 2
Massa Específica (g/cm³)	1,8 ~ 2,0	1,8 ~ 2,0
Retração de queima (%)	Máximo de 8	Máximo de 8
Absorção de água (%)	Máximo de 15	Máximo de 19
Resistência a compressão (kg/cm²)	Mínimo 150	Mínimo 100

Fonte: Adaptado de Weng; Lin e Chiang (2003).

Foram compostas misturas com 10%, 20%, 30% e 40% de lodo e os corpos-de-prova foram queimados a 880 ºC, 920 ºC, 960 ºC e 1000 ºC.

Os resultados de absorção de água estão apresentados na figura 26.

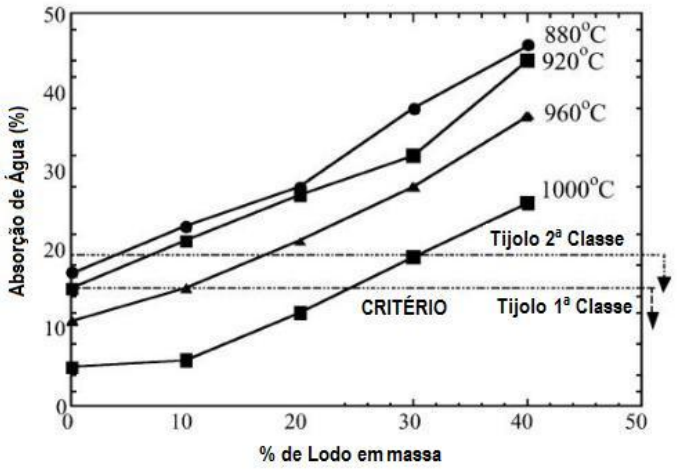


Figura 26: Absorção de água. Fonte: Weng; Lin e Chiang (2003).

Apenas os corpos-de-prova queimados nas temperaturas de 960 ºC e 1000 ºC apresentaram valores para o parâmetro de absorção de água aceitáveis para a produção de tijolos. Enquanto para a temperatura de 960 ºC apenas a composição de 10% de lodo se enquadre nas normas chinesas, para a temperatura de 1000 ºC até 30% de lodo é aceitável para a produção desse tipo de peças cerâmicas.

A figura 27 apresenta os resultados da densidade aparente.

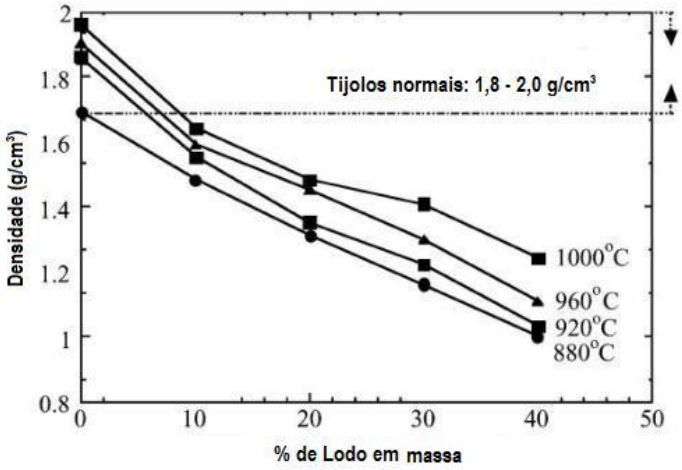


Figura 27: Densidade aparente. Fonte: Weng; Lin e Chiang (2003).

Os corpos-de-prova experimentaram uma redução em suas massas específicas, fora da faixa usual (entre 1,8 ~ 2,0 g/cm³), segundo **Weng, Lin e Chiang (2003)**, em função da quantidade de água absorvida pela massa cerâmica e pela temperatura de queima.

No ensaio de tensão de compressão, apresentada na figura 28, nota-se que para todas as temperaturas, verificou-se a possibilidade de incorporar o lodo industrial à massa cerâmica, pois a partir de 880 ºC foram observadas faixas de temperatura e composições com resistências superiores as mínimas requeridas.

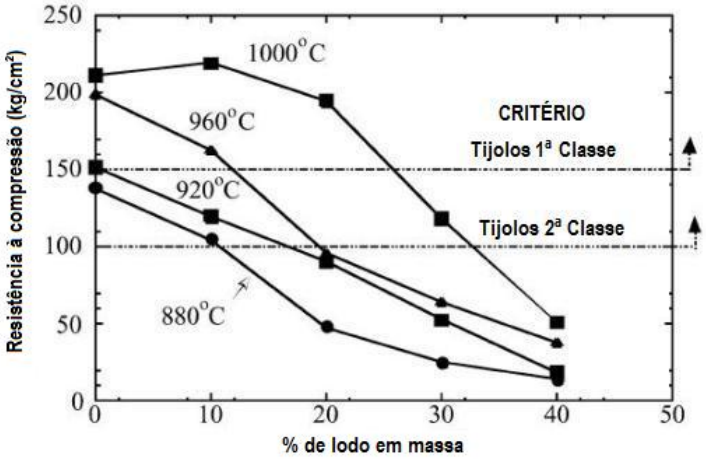


Figura 28: Resistência a compressão. Fonte: Weng; Lin e Chiang (2003).

Weng et al. (2003) conclui que o lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto industrial pode ser incorporado a massa para fabricação de tijolos, indicando 10% de lodo numa faixa de temperatura entre 880 ºC e 960 ºC como a faixa otimizada para produção de tijolos de boa qualidade.

Liew et al (2004) estudou a incorporação do lodo, gerado em estações de tratamento de esgotos na Malásia, na produção de tijolos de cerâmica vermelha. As normas malaias classificam os tijolos de acordo com a tensão de compressão e a absorção de água e estes são divididos em oito diferentes classes.

Os corpos-de-prova foram moldados por prensagem, com as seguintes composições: 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de lodo. Após a prensagem foram secos em câmaras de secagem a 150 ºC por 85 horas, e então queimados em forno contínuo. O ciclo de queima envolveu aquecimento de 150 ºC a 985 ºC em 12 horas, permanecendo a 985 ºC por 14 horas e finalmente atingindo temperatura ambiente em 16 horas.

A figura 29 apresenta o gráfico do comportamento da absorção de água em função da composição de lodo.

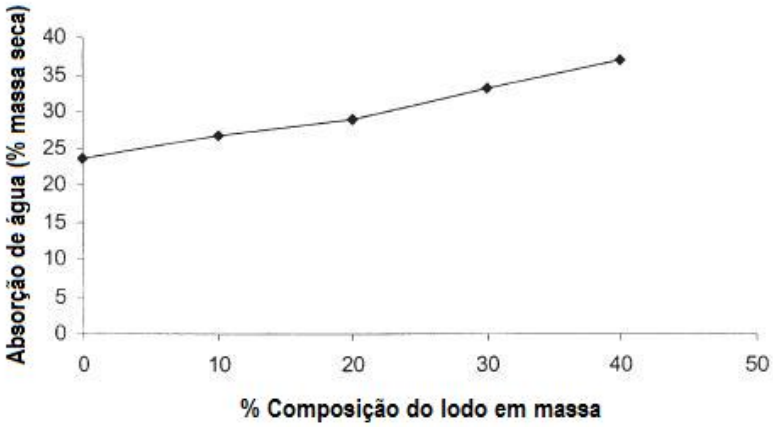


Figura 29: Absorção de água. Fonte: Liew et al. (2004).

Os valores de absorção de água são diretamente proporcionais a quantidade de lodo inclusa na massa para produção cerâmica.

A figura 30 apresenta o comportamento da resistência à compressão em função da quantidade de lodo incorporada.

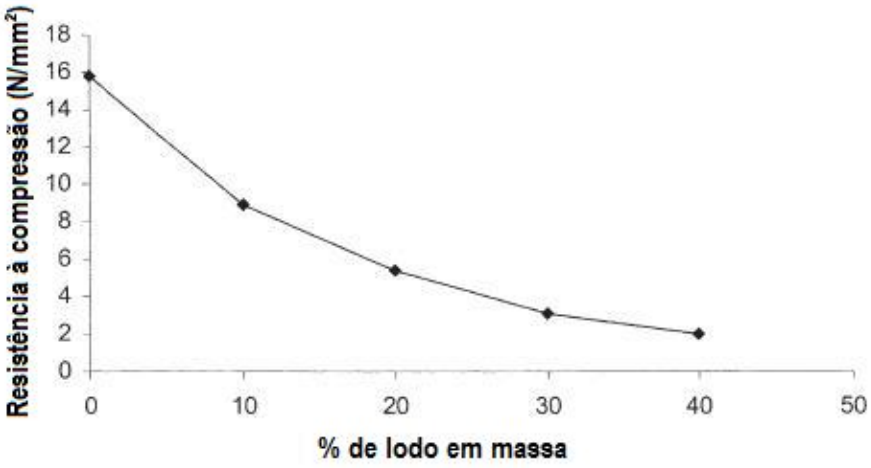


Figura 30: Resistência à compressão. Fonte: Liew et al. (2004).

As tensões de compressão para as peças com adição de lodo, variaram de 8,9 MPa, para composição com 10% de lodo, a 2 MPa para composição com 40% de lodo.

Ao final de seu estudo, **Liew et al. (2004)** conclui que é possível acrescentar lodo de estação de tratamento de esgoto à massa cerâmica para produção de tijolos, em proporções que variam até 40% que atendem as normas malaias para estruturas portantes e não-portantes, como rege a classificação malaia.

Jordán et al. (2005) estudaram a utilização de lodo de estação de esgotos na fabricação de tijolos na Espanha. Nesse trabalho, os autores caracterizaram duas argilas convencionais e três lodos de diferentes estações de tratamento de esgotos. A tabela 12 apresenta as caracterizações químicas das duas amostras utilizadas para confecção dos corpos-de-prova.

Tabela 12. Caracterização química de amostras de argila e lodo.

Parâmetro	Und.	Argila	Lodo
Massa Orgânica 500ºC	%	1,96	54,13
Perda de massa 1.000ºC	%	12,23	64,64
SiO_2	%	52,69	12,15
Al_2O_3	%	17,85	6,19
Fe_2O_3	%	7,15	15,24
CaO	%	11,29	32,18
MgO	%	4,24	1,66
Na_2O	%	0,394	0,584
K_2O	%	4,23	0,997
TiO_2	%	0,868	1,15
MnO	%	0,050	-
P_2O_5	%	0,195	13,39
BaO	%	0,06	0,133

Fonte: JORDÁN et al. 2005

Os corpos-de-prova foram confeccionados em composições variando de 1% a 10% que foram queimados em forno elétrico seguindo o ciclo de aquecimento padrão para corpos cerâmicos de alta porosidade.

Os parâmetros analisados foram à absorção de água e tensão de ruptura à flexão. A figura 31 apresenta o gráfico de absorção de água obtido nesse trabalho.

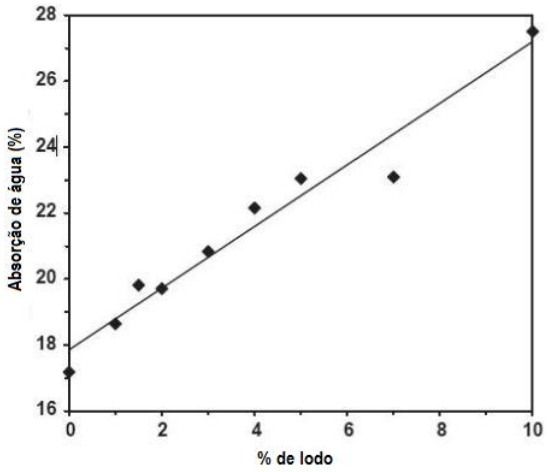


Figura 31. Absorção de água dos corpos-de-prova cerâmicos preparados com argila e lodo.

É possível observar que a medida que o teor de lodo aumenta, a absorção de água também aumenta, uma conseqüência direta da quantidade de matéria orgânica ignizada que é responsável pelos poros abertos nos corpos cerâmicos.

A tensão de ruptura à flexão, como esperado, também foi afetada em virtude da ignização da matéria orgânica, assim como representado na tabela 13.

Tabela 13. Tensão de ruptura à flexão dos corpos-de-prova sinterizados.

% Lodo	Tensão de ruptura à flexão (MPa)
0,0	14,69
1,0	11,56
1,5	11,26
2,0	11,03
3,0	9,55
4,0	8,60
5,0	8,41
7,0	8,66
10,0	4,59

Fonte: JORDÁN et al. 2005

Na conclusão de seu trabalho, **Jordán et al. (2005)** concluíram que embora as propriedades de absorção de água e tensão de ruptura à flexão sejam afetadas negativamente, esta opção é viável para a reciclagem do lodo produzido nas estações de tratamento de esgotos, principalmente pela capacidade de imobilização de metais pesados contidos no lodo.

Em estudos anteriores realizados por **Araújo (2005)**, foram caracterizadas uma amostra de argila e de um lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto da UFRN, visando a sua incorporação à massa para produção de cerâmica estrutural. A tabela 14 apresenta as proporções estudadas em seu trabalho.

Tabela 14. Composições formuladas

Composição	Argila plástica (%)	Lodo de ETE (%)
01	90	10
02	85	15
03	80	20
04	75	25
05	70	30
06	65	35

Fonte: ARAÚJO, 2005.

Os corpos-de-prova foram queimados nas temperaturas de 950 ºC, 1000 ºC e 1100 ºC e foram realizados ensaios de densidade, granulometria, limites de Atterberg para proposição da mistura, composição química, mineralógica e termogravimétricas. Após queimados, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de absorção de água e retração linear. Os corpos-

de-prova cilíndricos não puderam ser utilizados para a realização dos testes de resistência à flexão.

Seus resultados apontaram para uma possível utilização do lodo estudado como matéria-prima a ser utilizada na confecção de peças de cerâmica vermelha, porém, com ressalvas. Seria possível utilizar uma composição de até 25% de lodo de esgoto na composição das massas, contanto que a temperaturas de queima fossem suficientemente altas para sinterizar os corpos-de-prova e lhes garantir propriedades que se adequassem às normas brasileiras.

A figura 32 apresenta o gráfico obtido a partir dos ensaios de absorção de água, o qual demonstrou que para temperatura de queima igual a 950 ºC apenas composições com até 25% de lodo podem ser utilizadas, desde que seja possível conseguir reduzir a absorção de água. O aumento da temperatura de queima implicou, naturalmente, na redução da absorção de água das amostras.

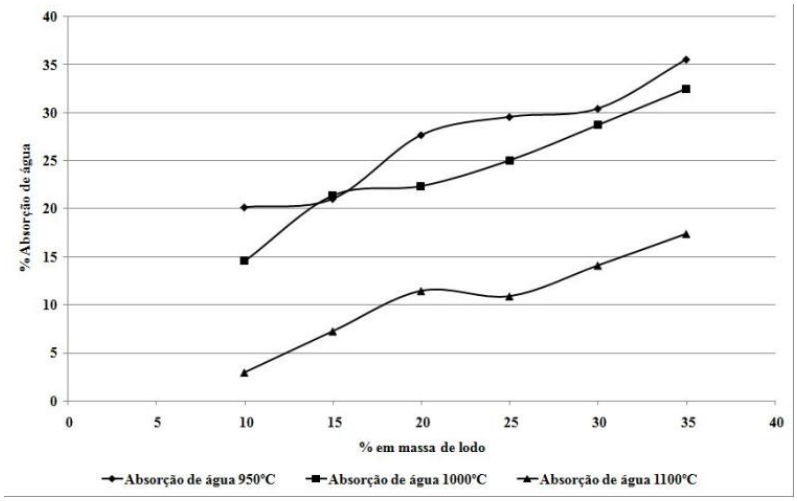


Figura 32: Absorção de água. Fonte: Adaptado de Araújo (2005)

As retrações lineares de queima, para os corpos-de-prova com 25% de lodo, atingiram valores da ordem de 11%, maiores que os recomendados por **Santos (1989)**, que é de 6% para tijolos furados.

Leite et al. (2005) utilizando corpos-de-prova extrudados em escala de laboratório, queimaram corpos-de-prova nas temperaturas de 900 ºC e 950 ºC, obtendo resultados de absorção de água iguais a 23,8% e 19,6% respectivamente, para peças confeccionadas com 25% de lodo. As peças queimadas a 950 ºC apresentaram resistência a compressão iguais a 1,9 N/mm², valor superior ao mínimo exigido pelas normas brasileiras. A retração linear

apresentou valores de 7,8%, o que poderia causar defeitos de ordem dimensional. **Leite et al. (2005)** concluíram sugerindo a adição de uma argila com menor plasticidade a fim de reduzir a retração linear das peças com adição de lodo.

As propriedades dos corpos-de-prova variam de acordo com a quantidade de lodo acrescentado à massa para fabricação cerâmica, mas também variam de acordo com a composição desse lodo, que é atribuída aos materiais descartados no sistema de coleta de esgotos. **Araújo (2005)** e **Leite et al. (2005)** concluíram em seus trabalhos que seria possível acrescentar até 25% de lodo da ETE UFRN, em massa seca, à massa para fabricação de cerâmica vermelha, dessa forma, neste trabalho é testado a viabilidade de inclusão de 25% de lodo da ETE UFRN com composição química diferente da estudada por **Araújo (2005)** e **Leite *et al.* (2005)**, observando ensaios não realizados nos dois trabalhos anteriores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão descritos os procedimentos experimentais, desde a coleta das matérias-primas, processamento, caracterização química e mineralógica e conformação dos corpos-de-prova. Serão ainda apresentados os procedimentos de secagem, queima e caracterização tecnológica dos produtos acabados.

O fluxograma da figura 33 apresenta o fluxograma da coleta e caracterização das matérias-primas utilizadas nesse trabalho.

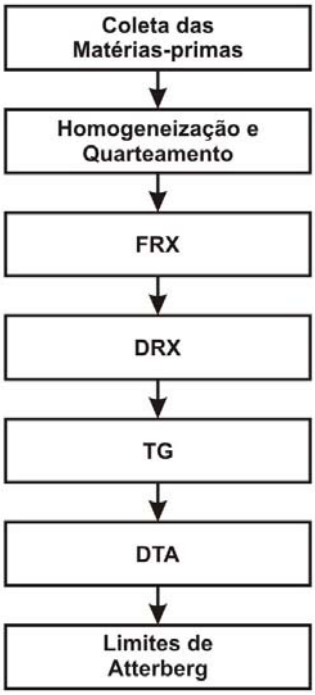


Figura 33. Fluxograma de caracterização das matérias-primas.

Após a caracterização das matérias-primas, estas foram blendadas e submetidas a queima e posteriores ensaios para determinação de suas propriedades, de acordo com o fluxograma apresentado na figura 34.

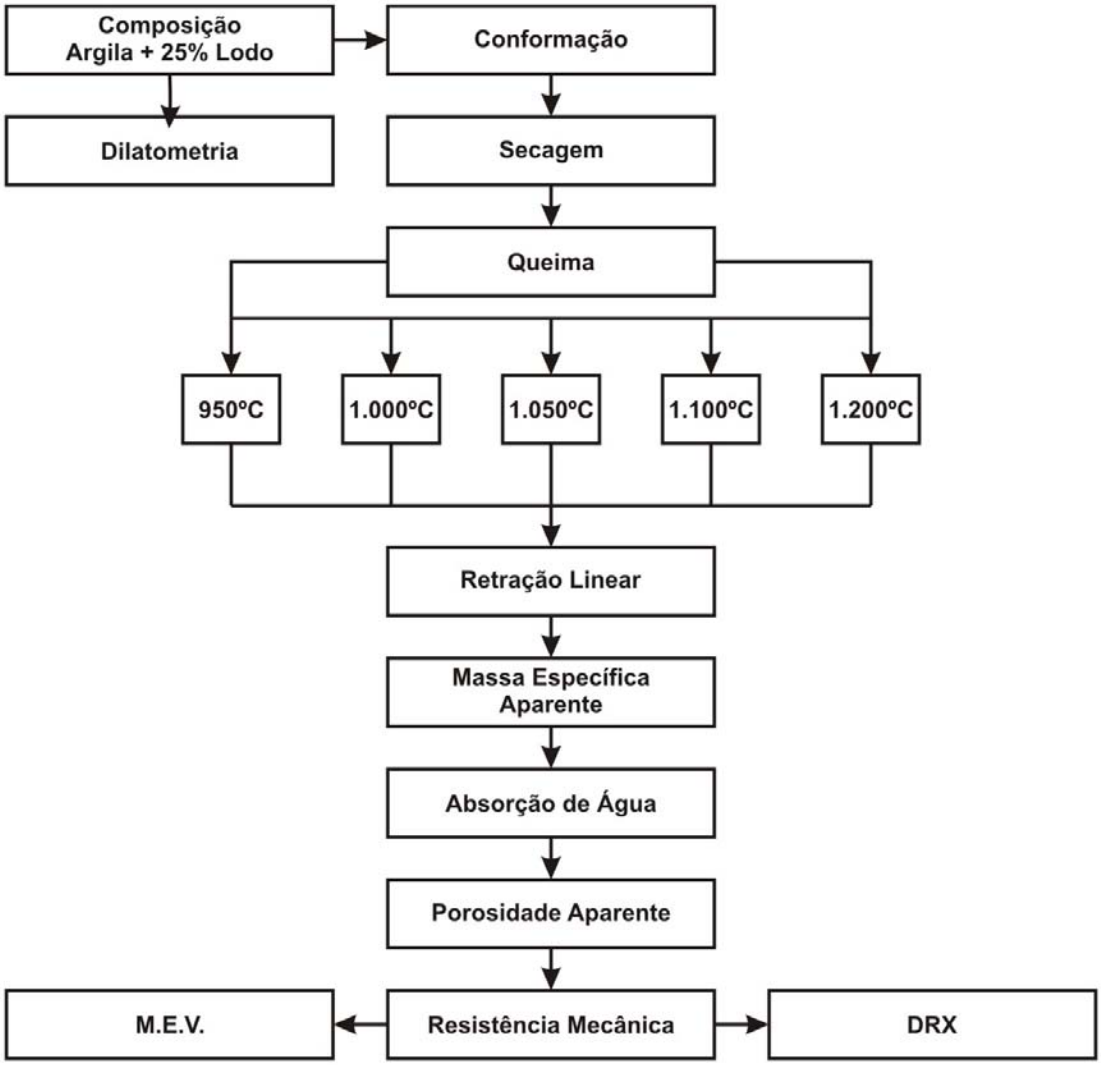


Figura 34: Fluxograma representativo do procedimento experimental

3.1 MATÉRIAS-PRIMAS

A argila utilizada neste estudo é proveniente do município de São Gonçalo do Amarante/RN, onde é lavrada e utilizada no fabrico de tijolos vermelhos na Cerâmica Samburá. O lodo é proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte em Natal/RN.

As matérias-primas foram coletadas, secas em estufa por 24h a 110 ºC, homogeneizadas e preparadas para os ensaios de caracterização.

3.1.1 Homogeneização e quarteamento

As amostras foram preparadas observando-se técnicas de homogeneização e quarteamento em pilha cônica.

Este método foi escolhido por proporcionar, durante a formação da pilha, uma boa homogeneização das amostras. O quarteamento é feito dividindo-se a pilha em quatro partes, a partir das quais são formadas duas novas pilhas, repetindo a operação até que uma amostra representativa, com a massa desejada, seja obtida.

3.2 CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 Análise química

Os materiais foram analisados quimicamente por fluorescência de raios-X por energia dispersiva (FRX) e o equipamento utilizado foi um Difratômetro de Raios-X XRD-7000, do Laboratório de Ensaios de Materiais do CTGÁS.

Os materiais foram adequados granulometricamente a uma faixa inferior a 200 mesh (74μm). O método utilizado foi o semiquantitativo em atmosfera de vácuo. Os resultados obtidos são apresentados em formas de óxidos mais estáveis dos elementos químicos presentes.

3.2.2 Análise mineralógica

A caracterização mineralógica das matérias-primas foi feito em difratômetro de raios-X XRD-6000 da *Shimadzu*. As amostras foram reduzidas à faixa menor que 200 mesh (74 μm) e em seguida foi empregado o processo padrão das amostras por prensagem manual do pó. Os experimentos de difração de raios-X foram realizados utilizando-se radiação Cu-Kα, com tensão de aceleração de 40 kV e corrente de 30 mA, com varredura de 2º a 80º para 2θ, com velocidade de varredura de 2º/min. A identificação das fases de cada matéria-prima foi dada por comparação entre os picos gerados no difratograma com cartas padrões no software ICDD (International Center for Difraction Data).

As principais vantagens inerentes a técnica de difração de raios-X para caracterização de fases, são a simplicidade e rapidez do método, sendo amplamente utilizado na análise de ligas metálicas, argilas, refratários, areias e vidros (**ABE; ONOSAKI; HASSUI, 1988**).

3.2.3 Análise termogravimétrica e termodiferencial

Os ensaios para análise termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (DTA) foram realizados utilizando-se os analisadores térmicos Thermogravimetric analyzer TGA-51 e Diferential thermal DTA-50 da Shimadzu. Foram utilizadas aproximadamente 20 g para cada análise sob fluxo de ar sintético de 50 ml/min. A taxa de aquecimento foi de 5 ºC/min entre 27 ºC a 1100 ºC (TG do lodo), 29 ºC a 1100 ºC (TG da argila), 22 ºC a 1100 ºC (DTA do lodo) e 24 ºC a 1100 ºC (DTA da argila). A análise dos resultados foi feita utilizando software TA-60, fornecido pela Shimadzu.

3.2.4 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg representam as quantidades de água que uma determinada substância possui no seu estado de transição entre o estado líquido e o plástico (LL) e quando perde a plasticidade (LP).

O índice de plasticidade (IP) é um fator determinado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

Os limites de Atterberg das matérias-primas foram determinados de acordo com as normas NBR 6459/84 (**ABNT, 1984**) e NBR 7180/84 (**ABNT, 1984**), de acordo com a equação 1.

$$IP = LL - LP \qquad \textbf{(1)}$$

Onde:

IP = Índice de plasticidade;

LL = Limite de liquidez;

LP = Limite de plasticidade.

3.2.5 Preparação das massas cerâmicas

As amostras foram destorroadas e classificadas granulometricamente, sendo utilizada a fração -48 mesh (295 µm), sendo formulada uma composição com 25% de lodo de estação de tratamento de esgoto.

Foram adicionados 10% em massa de água à massa cerâmica para conformação dos corpos-de-prova.

3.2.6 Conformação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram conformados por prensagem em matriz retangular com punção inferior e superior, fabricado em Aço 1020 com dimensões 6,0 x 2,0 x 0,5 cm, com pressão de 200 kgf/cm², como indicado por **SANTOS** (1989)

Após conformados, os corpos-de-prova foram secos em estufa a 110 ºC por 24h.

Após a secagem, os corpos-de-prova foram medidos com paquímetro digital marca Mitutoyo com resolução de 0,05 mm e pesados em balança analítica com resolução de 0,001 g Marca Marte AL500.

3.2.7 Análise dilatométrica

As análises dilatométricas foram realizadas utilizando-se corpos-de-prova prensados com massas semi-secas, em matriz uniaxial de aço, obtendo-se corpos-de-prova no formato cilíndrico com diâmetro de 10mm. Os ensaios foram realizados em um dilatômetro modelo RB 3000, marca RB engenharia. As amostras foram aquecidas a uma taxa de 5 ºC/min até a temperatura de 1200 ºC, utilizando atmosfera de ar sintético a uma vazão de 50 ml/min.

Foi ensaiado 01 corpo-de-prova para cada amostra com o objetivo de determinar os efeitos da adição do lodo na sinterização dos corpos-de-prova.

3.3 QUEIMA

Os corpos-de-prova foram queimados em mufla marca JUNG, modelo 0713 em atmosfera natural em patamar de 60 minutos e taxa de aquecimento de 5 ºC/min, nas temperaturas de 950 ºC, 1000 ºC, 1050 ºC, 1100 ºC e 1200 ºC no Laboratório de Processamento Mineral e de Resíduos, no CEFET-RN.

A curva de queima foi escolhida em virtude de proporcionar um aquecimento lento e possibilitar a ignição da matéria orgânica, com conseqüente saída dos gases gerados, de forma mais uniforme, reduzindo a possibilidade de deformação das peças.

O resfriamento foi natural em forno desligado até temperatura ambiente.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA QUEIMADOS

Todos os testes de caracterização dos corpos-de-prova queimados foram conduzidos utilizando-se 10 (dez) corpos-de-prova, afim de garantir a representatividade dos ensaios.

3.4.1 Retração linear (RL)

Antes e após a queima, os corpos-de-prova foram medidos com paquímetro digital, para determinar a retração linear, calculada a partir da equação 2.

$$RL\ (\%) = \frac{(L_0 - L_f)}{L_0}\ x\ 100 \qquad \textbf{(2)}$$

Onde: RL = Retração linear de queima (%);

L_0 = Comprimento do corpo-de-prova pré-queima (mm);

L_f = Comprimento do corpo-de-prova pós-queima (mm).

3.4.2 Massa específica aparente

A massa específica aparente (M_{ea}), em gramas por centímetro cúbico, é representada pelo quociente da massa de cada corpo-de-prova seco, pelo volume aparente calculado de acordo com a equação 3, determinado pela norma NBR 6220/89 (**ABNT, 1989**).

$$Mea = \frac{m_s}{V_a} \qquad \textbf{(3)}$$

Onde: M_{ea} = massa específica aparente (g/cm³);

M_s = massa seca (g);

V_a = Volume aparente (cm³).

3.4.3 Absorção de água (AA)

Este parâmetro mede a percentagem em peso de água absorvida pelo corpo-de-prova seco. Este parâmetro foi obtido de acordo com a norma NBR 6220/89 (**ABNT, 1989**). O procedimento consiste na secagem dos corpos-de-prova em estufa por 110ºC até obtenção de massa constante e imersão em água destilada durante 24 horas em um recipiente com água destilada. Em seguida, os corpos-de-prova foram removidos e o excesso de água superficial retirado com um pano umedecido e em seguido pesados em balança eletrônica Marca Marte AL500. Os valores de absorção foram calculados de acordo com a equação 4.

$$AA\ (\%) = \frac{(M_U - M_S)}{M_S}\ x\ 100 \qquad \textbf{(4)}$$

Onde: AA = Absorção de água (%);

M_u = Massa do corpo-de-prova úmido (g);

M_s = Massa do corpo-de-prova seco (g).

3.4.4 Porosidade aparente (PA)

Representa a percentagem do volume de poros abertos do corpo-de-prova em relação ao seu volume total. A porosidade aparente dos corpos-de-prova queimados foi determinada de acordo com a norma NBR 6220/89 (**ABNT, 1989**), calculada através da média de cinco determinações e utilizando-se a equação 5.

$$PA\ (\%) = \frac{(M_U - M_S)}{(M_U - M_I)}\ x\ 100 \qquad \textbf{(5)}$$

Onde: PA = Porosidade aparente (%);

M_u = Massa do corpo-de-prova úmido (g);

M_s = Massa do corpo-de-prova seco (g);

M_i = Massa do corpo-de-prova imerso em água, medido por balança hidrostática (g).

Os resultados foram obtidos através da média aritmética de cinco determinações.

3.4.5 Tensão de ruptura a flexão (TRF)

A tensão de ruptura à flexão refere-se à resistência do material à flexão simples pelo método dos três pontos, segundo a norma NBR 6113/90 (**ABNT, 1990**). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais da UFRN em uma máquina de ensaios mecânicos modelo Zwick/Roel BZ 2.5/TS1T, operando a uma velocidade de 0,5mm/min. Os ensaios para determinação da tensão de ruptura a flexão foram conduzidos com cinco corpos-de-prova.

A tensão de ruptura à flexão é dada pela equação 6.

$$TRF\left({}^{Kgf}/_{cm^2}\right) = \frac{3PL}{bh^2} \qquad \textbf{(6)}$$

Onde: TRF = Tensão de ruptura à flexão (Kgf/cm²);
P = Carga atingida no momento da ruptura (Kgf);
L = Distância entre os apoios do corpo-de-prova (cm);
b = Largura do corpo-de-prova (cm);
h = Altura do corpo-de-prova (cm).

3.4.6 Análise microestrutural

A superfície de fratura dos corpos-de-prova após a queima foi examinada em microscópio eletrônico de varredura, marca Shimadzu, modelo SSX-550 do Laboratório de Ensaios de Materiais do CTGÁS, utilizando-se voltagem de aceleração de elétrons entre 20 a 26 KkV.

As amostras foram colocadas em um porta amostra, aderidas a uma fita de carbono dupla face. Estas foram submetidas à metalização com uma fina camada condutora de ouro. As amostras foram analisadas empregando-se um detector de elétrons retro-espalhados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.1.1 Análise química

A composição química das matérias-primas estudadas está apresentada na tabela 15.

Tabela 15: Composição química da argila e lodo.

Óxidos Presentes	Concentrações (%)	
	Argila	**Lodo**
SiO_2	52,192	31,790
Al_2O_3	23,612	10,471
Fe_2O_3	11,384	14,784
K_2O	4,810	3,229
CaO	2,475	11,831
MgO	2,180	1,395
TiO_2	1,756	-
Na_2O	0,886	-
SO_3	-	9,192
BaO	-	9,602
P_2O_5	-	5,040
ZnO	-	1,340
Outros	0,705	1,326
Perda ao Fogo	**11,308%**	**64,296%**

Dentre os óxidos quantificados para a argila, os que ocorrem em maior concentração são SiO_2 e Al_2O_3 em concentrações características para o uso em cerâmica vermelha. O elevado teor de Al_2O_3 (23,612%) presente na argila tende a aumentar sua refratariedade (**VIEIRA; MONTEIRO; DUALIBI FILHO, 2001**). O teor de Fe_2O_3 (11,384%) está acima dos valores considerados normais para a argila (entre 4 e 8%), contribuindo para a formação de peças com coloração avermelhada, tendendo para o escuro, embora também favoreça o aparecimento de defeitos durante a queima devido a reação com o carbono proveniente da matéria orgânica com liberação de CO/CO_2 (**DAMIANI et al. 2001**).

A presença de 5,696% óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O) e 4,655% de alcalinos terrosos (CaO e MgO) na argila contribuem para um aumento de sua fundência, uma vez que agem

como fundentes de elevada energia em temperaturas próximas a 1100ºC (**VIEIRA; MONTEIRO; DUALIBI FILHO, 2001**). A presença de TiO_2 pode contribuir para reduzir os efeitos do Fe_2O_3 na coloração das peças queimadas. A perda ao fogo (11,308%) é um indicativo da presença de água livre e/ou ligada quimicamente, assim como a presença de matéria orgânica na amostra.

No lodo, os elementos SiO_2 e Fe_2O_3 foram os que apresentaram maiores concentrações, seguidos pelo CaO (11,831%), proveniente da cal utilizada para estabilização do lodo e outros elementos nutrientes característicos do lodo como o P_2O_5 (5,040%) proveniente em grande parte de detergentes (polifosfatos), SO_3 (9,192%), originário das fezes e águas de abastecimento presente principalmente na forma de sulfatos e sulfetos inorgânicos e o K_2O (3,229%). A elevada concentração de BaO (9,602%) pode estar associada ao descarte de poluentes no sistema de esgotos, que possui alguns laboratórios ligados a rede de esgotamento sanitário. Essa composição se aproxima da composição sugerida por **Chiou (2006) apud Rylei (1950)**, para argilas expansíveis, que é: SiO_2 48 – 70%; Al_2O_3 8 – 25%; Fe_2O + FeO 3 – 12%; CaO + MgO 1 – 12%; K_2O + Na_2O 0,5 – 7%.

4.1.2 Análise mineralógica

As figuras 35 e 36 apresentam os difratogramas de raios-x das amostras de argila e lodo utilizados como matéria-prima neste trabalho.

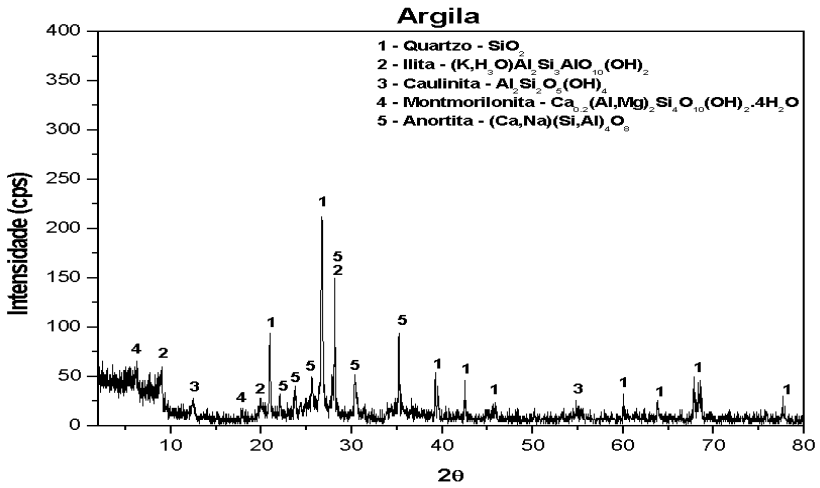


Figura 35: Difratograma de raios-x da argila.

A argila, de acordo com os picos característicos do difratograma, é composta essencialmente pelas fases cristalinas Quartzo (SiO_2), Ilita [$(K, H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$],

Caulinita [$Al_2SiO_5(OH)_4$], Montmorilonita [$Ca_{0,2}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.4H_2O$] e Anortita [$(Ca, Na)(Si, Al)_4O_8$], composição característica das argilas da região de São Gonçalo do Amarante, onde a amostra de argila foi coletada. A ausência da fase cristalina Fe_2O_3 pode indicar que o ferro presente esteja em solução com outras fases ou esteja presente em fase amorfa, razão pela qual não foi detectado pela difração de raios-X.

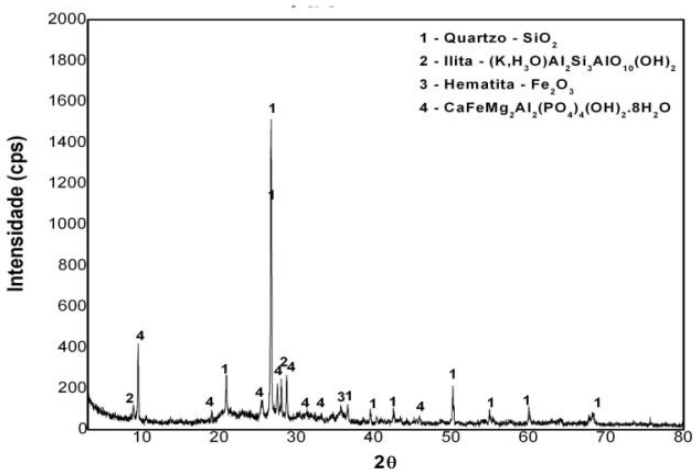


Figura 36: Difratograma de raios-x do lodo.

O lodo foi ignizado à 550 ºC para remoção da matéria orgânica e procedeu-se a sua análise, tendo sido identificadas as fases Quartzo, Ilita, Hematita e uma estrutura cristalina de forma $CaFeMg_2Al_2(PO_4)_4(OH)_2.8H_2O$. Essa mesma formação foi encontrada por **Guivarch (2001) apud Vanden Bossche (1999)** numa matriz rica em fósforo. **Leite *et al* (2005)**, utilizando lodo da mesma ETE, realizou difração de raios-x e identificou as fases cristalinas Quartzo e Anortita [$Ca(Al_2Si_2O_8)$], associadas a espécies arrastadas pelo sistema de tratamento de esgoto, onde o quartzo e o feldspato estão disponíveis nos materiais de construção e na área onde está localizada a estação de tratamento de esgotos, a qual se caracteriza por dunas.

4.1.3 Análise termogravimétrica e termodiferencial

As figuras 37 e 38 apresentam as análises termogravimétricas e térmicas diferenciais das amostras de argila.

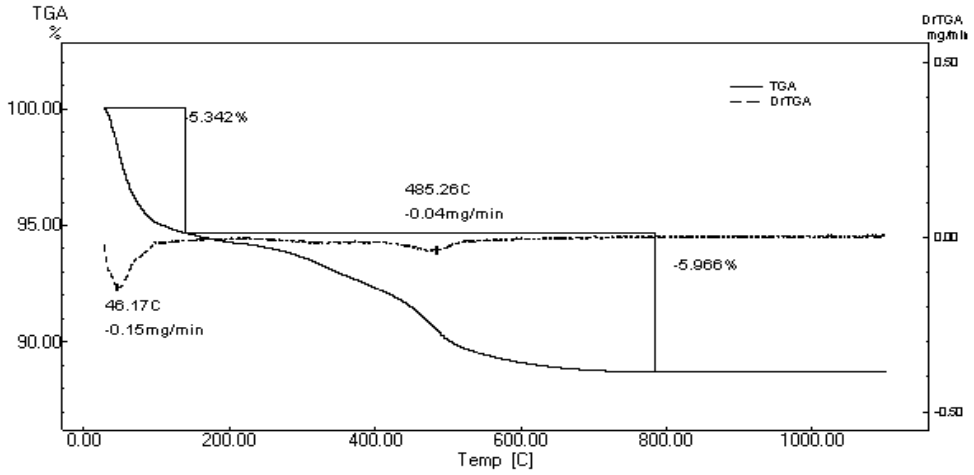


Figura 37: Análise termogravimétrica (TG) da amostra de argila.

É possível observar na análise termogravimétrica uma perda de massa de 5,3% entre as temperaturas de 28 ºC e 114 ºC, com máxima em 46 ºC, correspondente à perda de água livre e adsorvida. Em seguida ocorre uma redução de massa de 6% entre as temperaturas de 210 ºC e 550 ºC, com pico em 485 ºC, correspondente a desidroxilação da ilita/caulinita e decomposição da matéria orgânica.

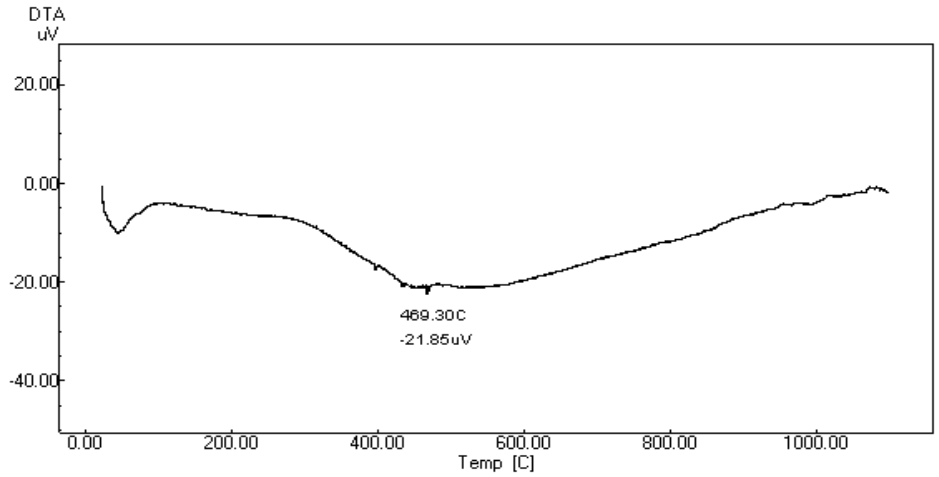


Figura 38: Análise termodiferencial (DTA) da amostra da argila.

A curva DTA apresenta pico endotérmico a 46 ºC correspondente a liberação da água livre, e um pico endotérmico a 469 ºC correspondente a perda da hidroxila da ilita/caulinita corroborando os resultados apresentados na figura 37.

As figuras 39 e 40 apresentam as análises termogravimétricas e termodiferenciais para o lodo. Identificam-se entre as temperaturas de 27 ºC e 80 ºC pico endotérmico em 48 ºC, correspondente a perda de água livre e redução da massa da ordem de 9,4%. Em seguida são

identificados dois picos exotérmicos em 323 e 458 ºC e perda de massa de 54,9% correspondentes a decomposição da matéria orgânica, perfazendo um total de 64,3%, como apresentado na tabela 15 para a perda ao fogo.

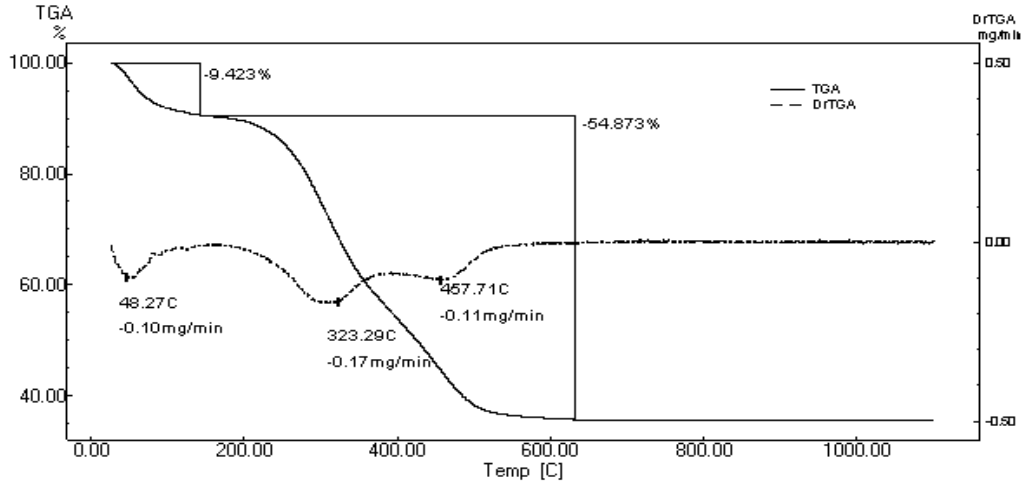


Figura 39: Análise termogravimétrica (TG) da amostra de lodo.

A análise DTA apresenta pico endotérmico em 48 ºC, característico da perda de água livre da amostras, e pico exotérmico em 306 ºC e 425 ºC, característicos da decomposição de matéria orgânica.

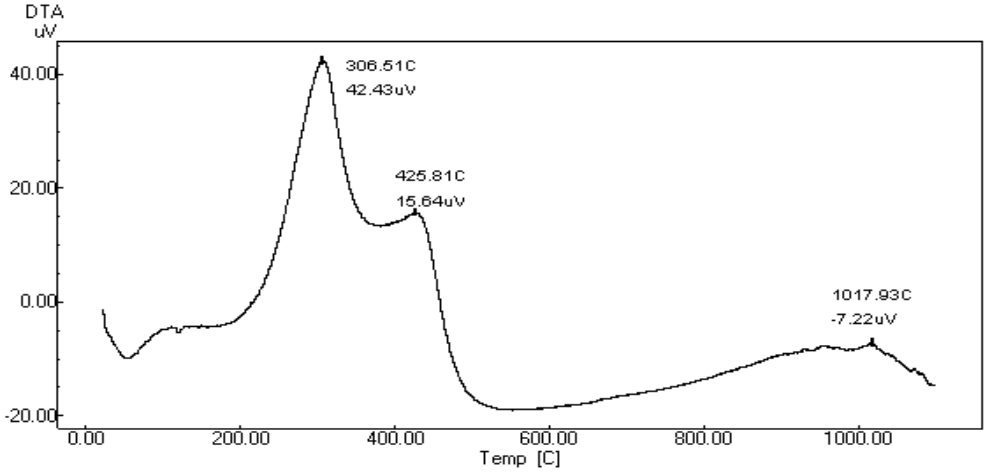


Figura 40: Análise termodiferencial (DTA) da amostra de lodo.

Ocorre também um pico exotérmico em 1017 ºC que pode estar associada à formação de fase anortita.

4.1.4 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg da argila e da composição argila + 25% de lodo foram determinados e os dados estão representados na figura 41.

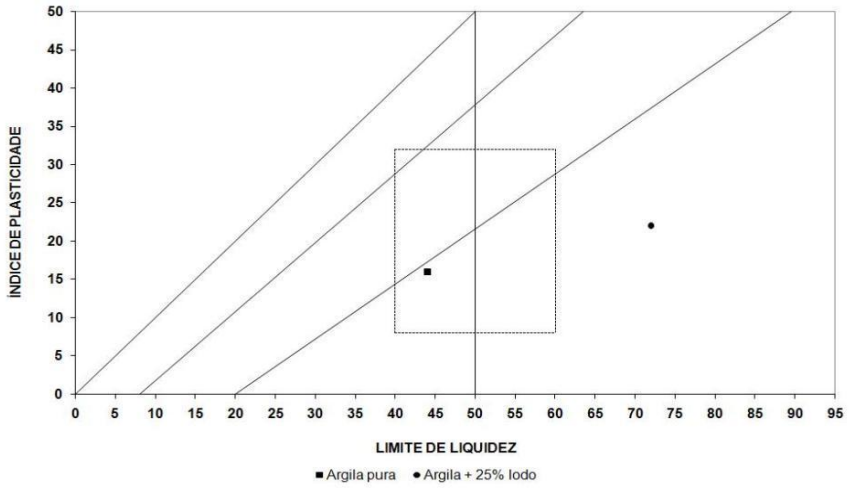


Figura 41: Diagrama de Casagrande.

O lodo foi classificado como não-plástico, pois não foi possível determinar seus limites de liquidez e plasticidade.

A argila apresentou-se dentro da zona de máxima trabalhabilidade, apresentando limite de liquidez igual a 44 e limite de plasticidade igual a 28, gerando um índice de plasticidade de 16, o que caracteriza a argila como altamente plástica (IP > 15).

A composição argila + 25% lodo apresentou limite de liquidez igual a 72, limite de plasticidade igual a 50 e índice de plasticidade igual a 22. Embora o lodo tenha sido caracterizado como não-plástico, a sua adição à argila aumentou consideravelmente a plasticidade da argila, um fato que está associado a quantidade de matéria orgânica (64,3%) e do óxido de cálcio (11,8%) presentes no lodo.

4.1.5 Análise dilatométrica

A figura 42 apresenta as curvas de dilatometria das amostras da argila de referência e com 25% de lodo de esgoto de ETE.

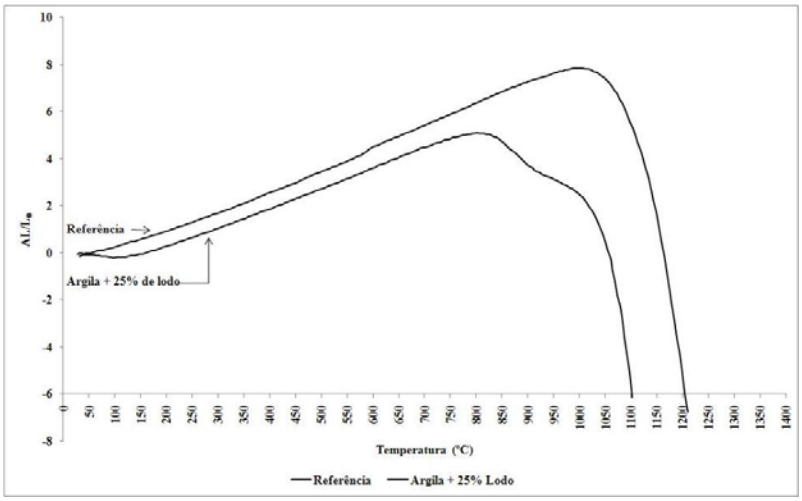


Figura 42: Dilatometria da argila e composição argila + 25% de lodo de ETE.

A dilatação na amostra referente à composição argila mais 25% de lodo ocorre até 810 ºC, com contração até 1000 ºC, e então retração característica de início da sinterização. É possível observar que a contração da amostra com lodo inicia-se antes da amostra de argila pura, fato que está associado à quantidade de elementos fundentes presentes no lodo: CaO (11,83%), K_2O (3,23%), MgO (1,40%) e BaO (9,60%).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA QUEIMADOS

Os corpos-de-prova, após a queima foram submetidos à inspeção visual e aqueles corpos-de-prova queimados em temperaturas inferiores a 1.100 ºC demonstraram grande fragilidade, desmanchando-se ao toque.

Os corpos-de-prova queimados nas temperaturas de 1.100 ºC e 1.200 ºC foram submetidos a ensaios de análise mineralógica e microscopia eletrônica de varredura, enquanto os corpos-de-prova queimados nas temperaturas inferiores também foram submetidos aos ensaios de retração linear de queima, massa específica aparente, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão.

4.2.1 Análise mineralógica

Foram realizadas análises mineralógicas nos corpos-de-prova sinterizados nas temperaturas de 1100 ºC e 1200 ºC, os quais estão representados nas figuras 43 a 46.

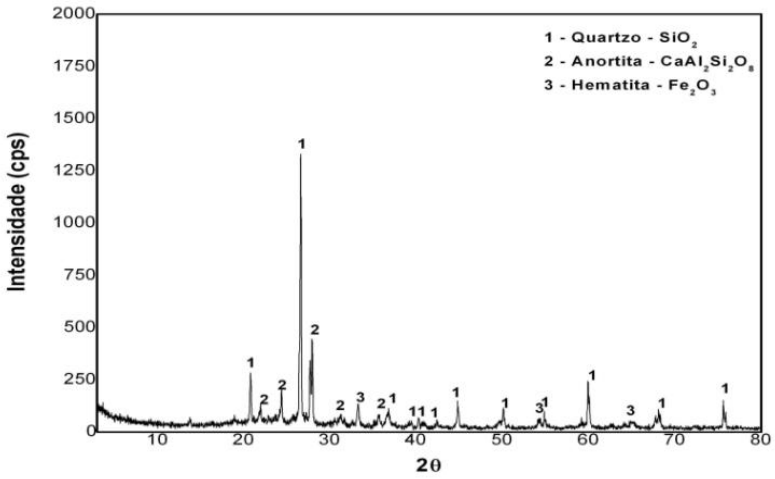


Figura 43. Difratograma de raios-x do corpo-de-prova de referência sinterizados a 1.100ºC.

Os corpos-de-prova de referência, sinterizados a 1.100 ºC apresentaram quartzo, anortita e hematita em sua composição. Como picos de hematita não foram observados no difratograma da argila pura, na figura 35, há uma forte evidência que a hematita identificada seja proveniente de hidróxidos de ferro amorfos e, portanto, não identificáveis em raios-x, como a limonita, ou que tenha sido liberado a partir da ilita e montmorilonita em temperaturas a partir de 900 ºC e 800 ºC respectivamente.

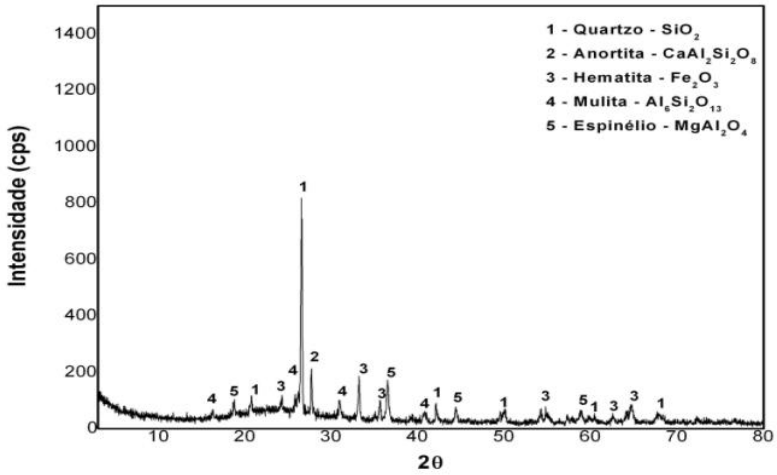


Figura 44. Difratograma de raios-x do corpo-de-prova de referência sinterizados a 1.200ºC.

A 1.200 ºC a amostra de referência apresentou as fases anortita, hematita, mulita ($Al_2Si_2O_{13}$) e espinélio ($MgAl_2O_4$). Nessa temperatura as duas fases estão presentes, pois ainda não houve a transformação completa do espinélio, formado à aproximadamente 950 ºC, em mulita, que ocorre a aproximadamente 1250 ºC, como mostra **Santos (1989)**.

A figura 45 apresenta o difratograma de raios-x para os corpos-de-prova sinterizados a 1.100 ºC com adição de 25% de lodo. Observa-se que as mesmas fases presentes na amostra de referência sinterizadas a 1.100 ºC também estão presentes nessa amostra com 25% de lodo, mostrando que o lodo não contribuiu, nessa temperatura, para a formação de novas fases.

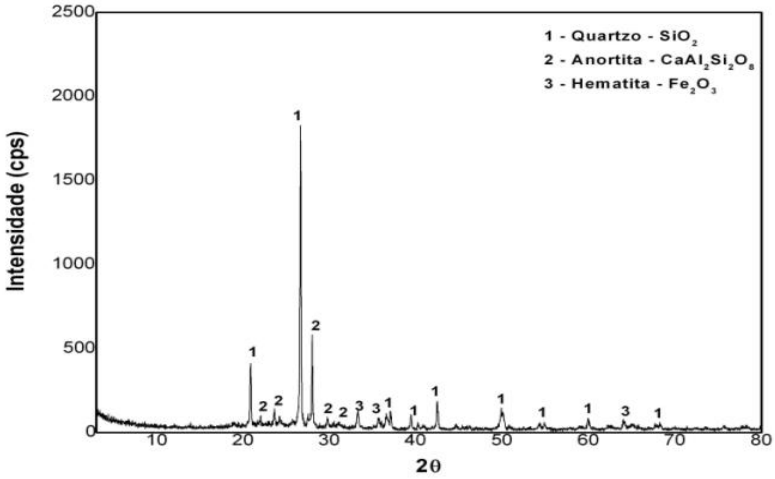


Figura 45. Difratograma de raios-x do corpo-de-prova com 25% de lodo sinterizado à 1.100ºC.

Na figura 46, está representado o difratograma dos corpos-de-prova sinterizados a 1.200 ºC com adição de lodo. Esta amostra não apresentou a fase mulita, que apareceu nos corpos-de-prova de referência, sendo identificado apenas o espinélio.

Segundo **Santos (1989)**, a transformação do espinélio em mulita inicia-se por volta de 1.100 ºC, havendo uma transformação total por volta dos 1.200 ºC. Como pode ser observado na figura 46, esta transformação não ocorreu, o que pode estar associado a adição do lodo à argila.

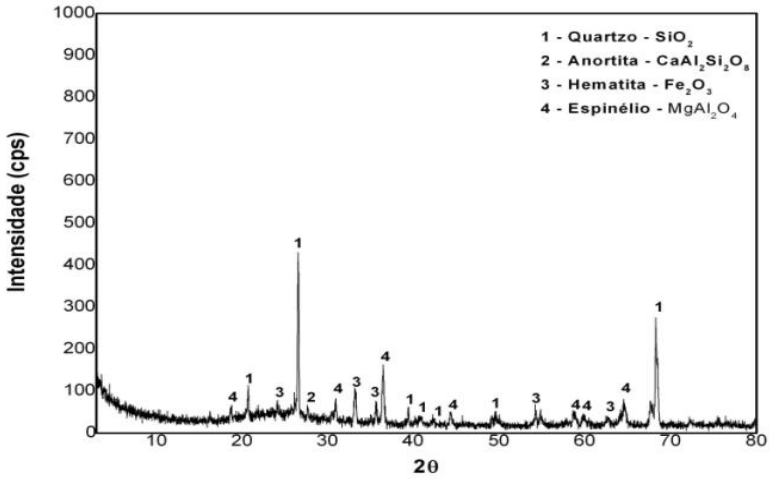


Figura 46. Difratograma de raios-x do corpo-de-prova com 25% de lodo sinterizado à 1.200ºC.

4.2.2 Retração Linear de Queima

Santos (1989) recomenda para tijolos furados e telhas, valores de retração linear de queima inferiores a 6% e 5% respectivamente. A figura 47 apresenta as retrações lineares de queima sofridas pelos corpos-de-prova de referência e com adição de 25% de lodo, em função da temperatura de queima.

Os corpos-de-prova de referência apresentaram retrações variando de 0% em 950 ºC a 4,82% em 1.200 ºC, retração que está associada à densificação do material.

Os corpos-de-prova com lodo apresentaram aumento progressivo de retração até 1.100 ºC e em seguida uma redução nesse valor. As retrações variaram entre 2,74%, em 950 ºC até 10,31% em 1.100 ºC com decréscimo em 1.200 ºC.

Os corpos-de-prova queimados a 1.200 ºC sofreram retração linear de queima característica da vitrificação, porém, também sofreram inchamento, refletindo no gráfico como uma redução em sua retração linear de queima.

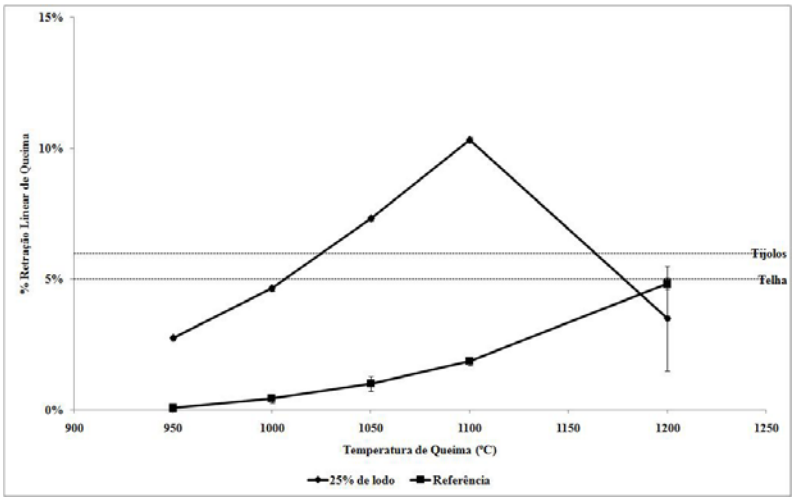


Figura 47: Retração linear de queima.

Os corpos-de-prova com 25% de lodo também apresentaram uma variação considerável em suas dimensões, estando associadas às deformações sofridas durante a sinterização a 1.200 ºC como mostra a figura 48.

Figura 48. Corpos-de-prova com adição de 25% de lodo sinterizados a 1.200ºC.

4.2.3 Massa específica aparente

Os resultados apresentados na figura 49 mostram uma pequena variação da massa específica em função das temperaturas estudadas, variando entre 1,67 g/cm³ a 1,97 g/cm³.

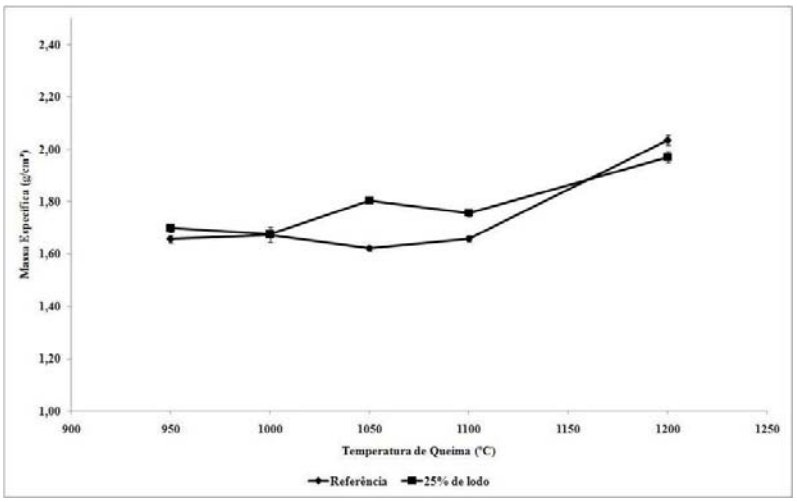


Figura 49: Massa específica aparente.

A pequena variação da massa específica, quando relacionada com outros parâmetros, como a absorção de água e porosidade aparente, reforça a teoria da formação de poros fechados nas peças sinterizadas em 1200 ºC.

4.2.4 Absorção de água

A figura 50 apresenta a variação de absorção de água dos corpos-de-prova em função da temperatura de queima.

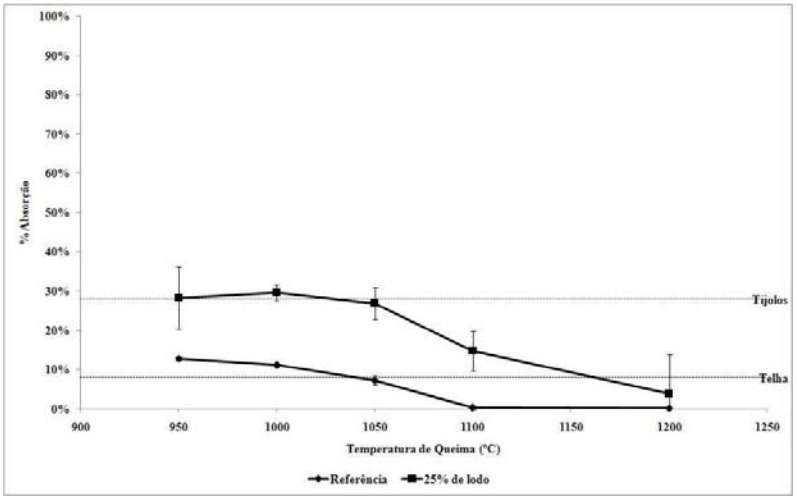


Figura 50: Absorção de água.

Os corpos-de-prova com adição de lodo apresentaram percentagens de absorção de água variando entre 3,8 e 29,6%. Como é possível observar na figura 42, a massa cerâmica composta por argila e lodo apresenta dilatação menor que a amostra de argila pura em função dos fundentes presentes na massa, porém, a alta porosidade apresentada para a faixa de temperatura entre 950 ºC e 1.050 ºC nos leva a crer que exista um maior espaçamento entre as partículas, atribuído a combustão da matéria orgânica do lodo, que ao ser ignizada, deixa espaços entre os grãos, que demoram a ser preenchidos pela massa fundida. A partir de 1.050ºC, do ponto de vista de absorção de água, é possível a obtenção de tijolos. A argila pura apresentou absorção máxima de 12,87% para temperatura de 950 ºC.

Em temperaturas de sinterização superiores a 1.050 ºC, a composição argila mais lodo se enquadra dentro dos valores máximos sugeridos por **Santos (1989)** que são inferiores a 28%.

4.2.5 Porosidade aparente

A porosidade aparente dos corpos-de-prova de argila mais lodo, apresentadas na figura 51, variou entre 7,5% e 49,6%. Os resultados de porosidade, como já eram de esperar, refletiram em um aumento proporcional da absorção de água.

Em temperaturas de queima inferiores a 1100 ºC, os corpos-de-prova apresentavam sinais de baixa sinterização, sendo extremamente frágeis e desfazendo-se com o contato.

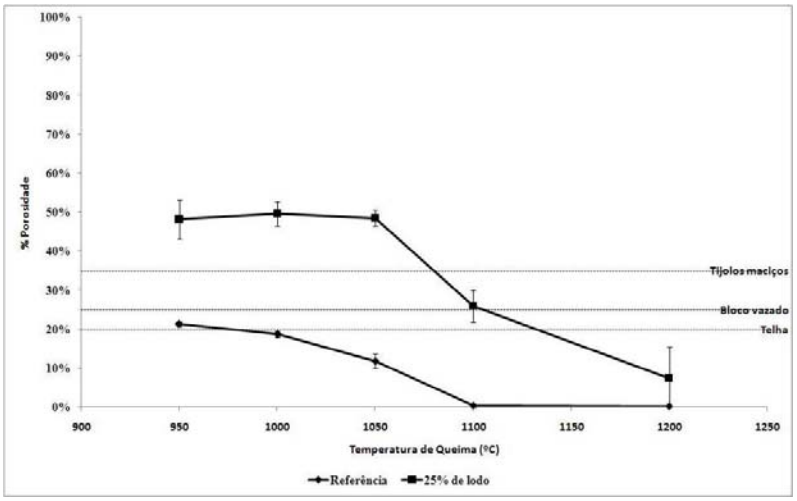


Figura 51: Porosidade aparente.

Da mesma forma que nas faixas sugeridas por **Santos** (1989) para absorção de água, apenas os corpos-de-prova queimados a partir de 1100 ºC apresentaram valores de porosidade dentro das faixas indicadas para a produção de produtos de cerâmica vermelha.

4.2.6 Tensão de ruptura à flexão

Na figura 52 está representado o comportamento da tensão de ruptura dos corpos-de-prova em função da temperatura de queima e os valores mínimos recomendados por **Santos (1989)**.

Nos testes de resistência mecânica, foram ensaiados também, corpos-de-prova de referência, conformados apenas com argila. Para a faixa de temperatura de queima entre 950 ºC e 1100 ºC é possível observar que os corpos-de-prova sem lodo apresentam-se dentro da faixa para utilização na produção de tijolos de alvenaria, com valores de resistência que variaram de 3,7 MPa a 4,1 MPa. O aumento na resistência dos corpos-de-prova queimados a 1200 ºC é bastante significativo, alcançando um valor médio de 15,4 MPa.

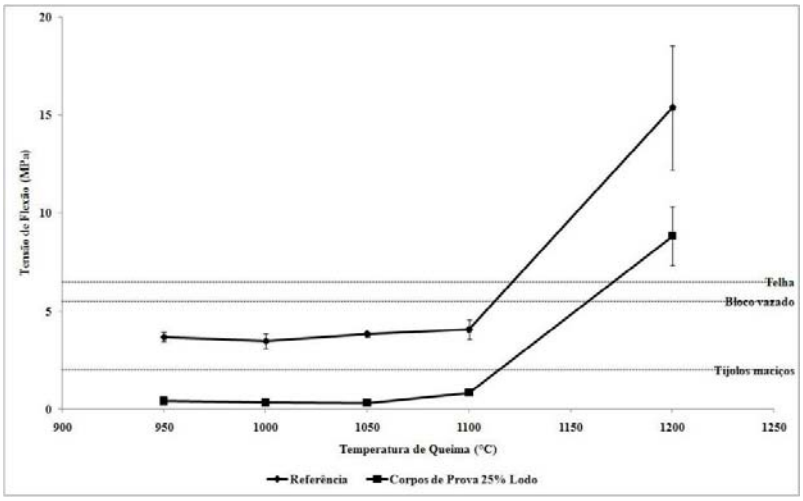


Figura 52: Tensão de ruptura à flexão.

A adição de lodo de ETE à massa cerâmica reduziu significativamente os valores de resistência à flexão, permanecendo inferior a 1MPa na faixa de temperatura de 950 ºC a 1100 ºC.

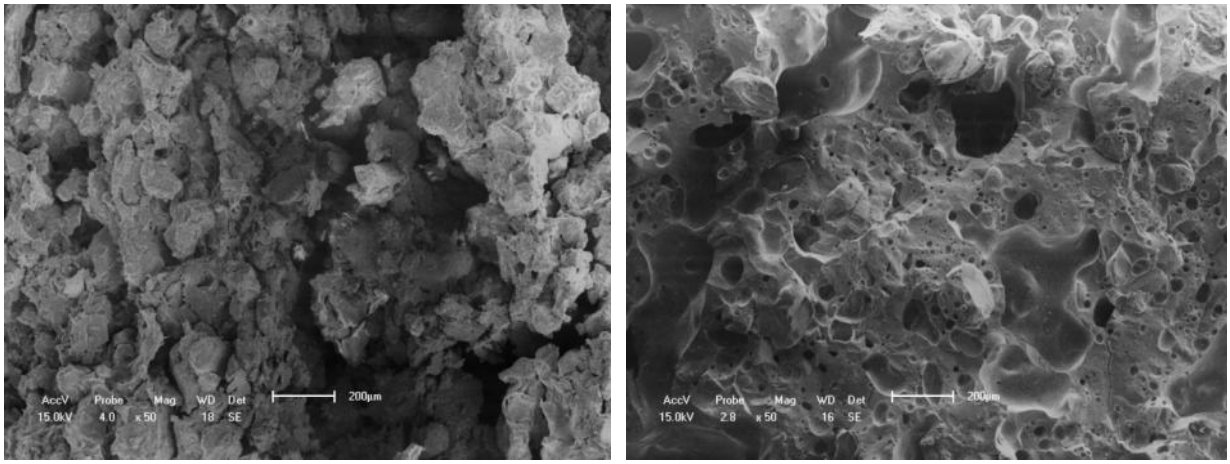
Em 1100 ºC, os corpos-de-prova de argila mais lodo apresentaram tensão de ruptura a flexão de 0,82 MPa, valor aproximadamente 10 vezes menor que os 8,8 MPa obtidos na queima dos corpos-de-prova a 1200 ºC, única temperatura empregada no trabalho na qual os corpos-de-prova apresentaram valores superiores aos mínimos exigidos por **Santos (1989)** para produção de produtos de cerâmica vermelha.

4.2.7 Análise microestrutural

As figuras 53 a 56 apresentam a microestrutura da superfície de fratura das amostras de argila com 25% em peso de lodo, sinterizadas a 1.100 ºC e 1.200 ºC, analisadas por microscopia eletrônica de varredura.

Comparando-se as figuras 53a e 53b, com ampliação de 50x, é possível observar claramente as diferenças entre as microestruturas, com uma evolução do fechamento dos poros, conseqüência da sinterização.

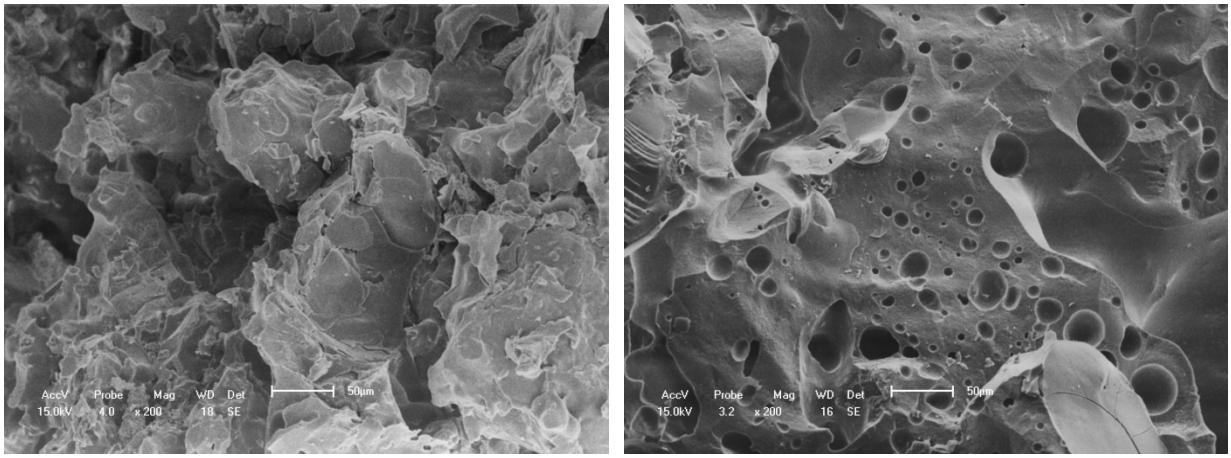
As duas amostras apresentam superfície de fratura rugosa, com efeito mais acentuado no corpo-de-prova sinterizado a 1.100 ºC. Essa rugosidade é causada pela não formação de uma fase líquida suficiente para propiciar uma sinterização eficiente com alisamento da superfície e pouca quantidade de defeitos. Na amostra sinterizada a 1.200 ºC é possível notar a predominância da fase vítrea, embora ainda com grande quantidade de poros.



(a) 1100ºC **(b) 1200ºC**

Figura 53: Micrografia MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova com adição de 25% de lodo com aumento de 50x.

As figuras 54a e 54b apresentam uma ampliação de 200x das amostras sinterizadas a 1.100 ºC e 1.200 ºC. A grande quantidade de poros e trincas presentes na amostra queimada a 1.100 ºC contribui para a baixa resistência mecânica das peças, que atingiram valores inferiores a 1 MPa, em oposição as peças sinterizadas a 1.200 ºC com 8,8 MPa.



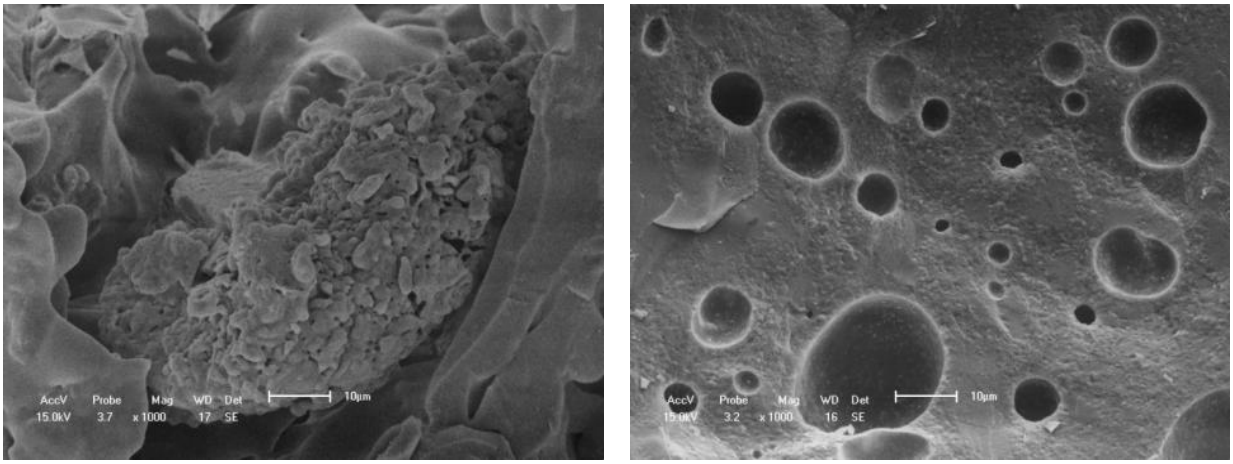
(a) 1100ºC **(b) 1200ºC**

Figura 54. Micrografia MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova com adição de 25% de lodo com aumento de 200x.

A menor densificação dos corpos-de-prova sinterizados a 1.200 ºC, quando comparada com os corpos-de-prova de referência, sinterizados na mesma temperatura, pode ser explicada pela grande quantidade de poros não comunicantes como mostra a figura 54b. Essas regiões, por não serem ocupadas pela fase vítrea, reduzem a densificação do corpo-de-prova.

Na figura 55a observa-se uma região formada por agregado livre numa fase vítrea. A amostra sinterizada a 1200 ºC (figura 55b) apresenta uma fase homogênea com formação de

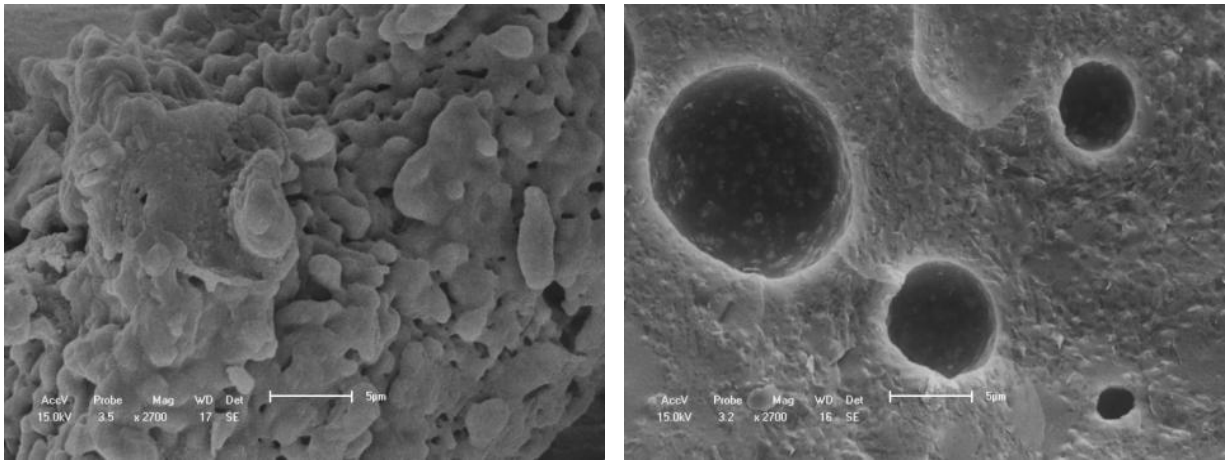
poros de variados tamanhos. Os poros do corpo-de-prova sinterizado a 1.200 ºC são arredondados e regulares.



(a) 1100ºC **(b) 1200ºC**

Figura 55: Micrografia MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova com adição de 25% de lodo com aumento de 1000x.

A figura 56a apresenta um detalhe do agregado livre mostrado na figura 55a. A estrutura apresenta superfície arredondada, o que é característico de fases amorfas formadas durante o processo de sinterização por fase líquida dos componentes com características fundentes, presentes nas matérias-primas.



(a) 1100ºC **(b) 1200ºC**

Figura 56: Micrografia MEV da superfície de fratura dos corpos-de-prova com adição de 25% de lodo com aumento de 2700x.

A figura 56b apresenta um detalhe dos poros presentes na fase vítrea do corpo-de-prova sinterizado a 1.200 ºC. Pode-se notar que não há comunicação entre os poros na fase vítrea,

corroborando os dados obtidos para a porosidade aparente e absorção de água, uma vez que estes poros não são comunicantes, reduzindo sensivelmente os valores de porosidade aparente e absorção de água.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, podemos concluir:

1. As amostras de argila e de lodo apresentaram quantidades significativas de óxidos alcalinos e alcalinos terrosos que contribuíram, de acordo com a análise dilatométrica, para a redução do ponto de sinterização da mistura lodo mais argila.
2. Uma quantidade considerável de óxido de bário foi detectado na análise química da amostra de lodo, que está associado ao descarte desse material pelos laboratórios ligados a rede de coleta de esgoto da UFRN.
3. A cal utilizada na estabilização do lodo, detectada na forma de CaO, contribuiu, junto com a matéria orgânica, para o aumento dos Limites de Atterberg, efeito que está mais diretamente ligado à pega proporcionada pela cal.
4. Até 1.100 ºC o lodo não influenciou diretamente na formação de fases, mas retardou, na temperatura de 1.200 ºC, a formação da fase mulita, preservando a fase espinélio, que de acordo com **Santos (1989)**, inicia a sua conversão a aproximadamente 1.100 ºC e é convertida completamente em temperaturas próximas a 1.200 ºC.
5. Os corpos-de-prova com adição de lodo sofreram aumento progressivo na retração linear de queima até 1.100 ºC, com redução em 1.200 ºC, fato associado ao inchamento da peça nessa temperatura. O mesmo comportamento não foi observado nos corpos-de-prova de referência, uma vez que a quantidade de material volatilizado durante a queima é muito baixo e a retração mantém sua tendência de progressão com o aumento da temperatura.
6. A densidade dos corpos-de-prova sofreu alteração de acordo com o aumento da temperatura de queima, conseqüência direta da formação da fase vítrea e preenchimento dos poros. Os corpos-de-prova com adição de lodo, queimados na temperatura de 1.200 ºC apresentaram valores de densidade inferiores aos obtidos pelos corpos-de-prova de referência. Esses dados, em conjunto com os obtidos para porosidade e absorção de água, corroboram a formação de poros fechados, que são confirmados pela análise de imagens obtidas na microscopia eletrônica de varredura,

onde se observa poros de tamanhos variados, arredondados e não comunicantes na estrutura dos corpos-de-prova confeccionados com 25% de lodo.

7. Os corpos-de-prova com adição de 25% de lodo apresentaram valores de tensões de ruptura à flexão inferiores aos mínimos exigidos para a fabricação de blocos em temperaturas até 1.100 ºC, mas obtiveram valores que justificariam a produção de telhas na temperatura de 1.200 ºC, fato atribuído a consolidação da fase vítrea.
8. Quando comparados esses resultados com os obtidos por **Slim e Wakefield (1991) apud Werther e Ogada (1999)**, **Liew *et al.* (2004)**, **Jordán *et al.* (2005)**, **Araújo (2005)** e **Leite *et al.* (2005)** percebe-se que não existe uma composição de lodo ideal a ser adicionada à massa para produção de cerâmica vermelha. Essa quantidade é variável e depende dos elementos presentes na argila e no lodo e que podem interferir de diversas maneiras na qualidade do produto cerâmico
9. A temperatura de queima é um parâmetro importante e está ligada a quantidade de elementos fundentes e da matéria orgânica presente nas matérias-primas. A temperatura de 1.200 ºC, temperatura onde todos os parâmetros apontaram para a produção de telhas, não é uma temperatura tecnologicamente viável para a produção desse tipo de produto e em temperaturas inferiores alguns parâmetros, como a retração linear de queima e a tensão de ruptura à flexão, inviabilizam a produção de produtos com exigências técnicas inferiores.
10. Do ponto de vista ambiental, é seguro afirmar que a incorporação do lodo à massa para fabricação de cerâmica vermelha é completamente viável e resolve o problema de disposição inadequada desse resíduo.

Como sugestões para trabalhos futuros:

1. Estudar a incorporação de uma argila ou resíduo com baixa plasticidade, para tentar compensar os efeitos nocivos do excesso de plasticidade ocasionado pela matéria orgânica e a cal presentes no lodo, de forma a ajudar na liberação dos gases e reduzir os problemas relacionados à retração linear de queima dos corpos-de-prova.
2. Estudar a composição dos gases formados durante a sinterização das peças cerâmicas, de forma que o problema ambiental da disposição dos resíduos não seja simplesmente trocado por um problema de poluição do ar.

REFERÊNCIAS

ABE, C. Y. S.; ONOSAKI, L. S.; HASSUI, N. **Algumas técnicas analíticas aplicadas às matérias-primas e produtos cerâmicos**. In: Curso internacional de treinamento em grupo em tecnologia cerâmica. IPT/JICA. São Paulo: IPT, 1988.

ABIKO, A. K. **Solo-cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas.** In. Construção São Paulo n. 1863. Pini – SP.

AMBIENTE BRASIL S/S LTDA. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&conteudo=./residuos/residuos.html>. Acesso em: 16 de jan.de 2008.

ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. **Processamento de lodos de estações de tratamento de esgoto (ETE)**. In: Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. PROSAB. Curitiba: ABES, 2001.

ARAÚJO, F. S. D. **Estudo da viabilidade de incorporação de lodo de estações de tratamento de esgotos em cerâmica vermelha.** Natal: CEFET-RN, 2005, 40p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.113**: Materiais refratários densos conformados: Determinação da resistência à flexão à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.220**: Materiais densos conformados: Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.459**: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.113**: Material refratário denso conformado: Determinação da resistência à flexão à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 1990.

BASEGIO, T. M.; BERUTTI, F. A.; BERGMANN, C. P. **Aspectos ambientais no uso de lodo de curtume como matéria-prima para cerâmica vermelha**. 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2001.

CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. S.; TANNO, L. C. **Rochas e minerais industriais: Usos e especificações.** Edição: Adão Benvindo LUZ e Fernando Freitas LINS. Rio de Janeiro: CETEM, 2005.

CHIOU, I. J.; WANG, K. S.; CHEN, C. H.; LIN Y. T. **Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash**. Waste Management, Janeiro de 2006: p. 1453-1461.

COSTA, A. N.; RODRIGUES, C.; TELES MUNARO, C.; KROHLING, B.; GONÇALVES, R. F. **Reciclagem agrícola do lodo de lagoas de estabilização**. In: Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas. PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

DAMIANI, J. C.; PEREZ, F.; MELCHIADES, F. G.; BOSHI, A. O. **Coração negro em revestimentos cerâmicos: principais causas e possíveis soluções**. Revista Cerâmica Industrial, nº. 2 (Março/Abril 2001): p. 12-16.

DIAS, G. F. **Educação ambiental: princípios e práticas**. 2ª Edição Revisada e Ampliada. São Paulo: Gaia, 2000.

GONÇALVES, R. F.; LIMA, M. R. P.; PASSAMANI, R. R. F. **Características físico-químicas e microbiológicas do lodo de lagoas**. In. Gerenciamento de lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas. PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. São Carlos. USP, 2003.

GUIVARCH, A. **Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines**. Bordeux. INPL. 2001.

HAANDEL, A.; SOBRINHO, P. A. **Produção, composição e constituição de lodo de esgoto**. In: Biossólidos. PROSAB. Curitiba: ABES, 2006.

IBGE. **Atlas de saneamento**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: IBGE, 2004.

INGUNZA, M. P. D.; ANDREOLI, C. A.; NASCIMENTO, R. M.; TINÔCO, J. D.; HOPPEN, C.; PEGORINI, E. S. **Uso de resíduos do saneamento na fabricação da cerâmica vermelha**. In: Biossólidos. PROSAB, 417p. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

INGUNZA, M. P. D.; TINÔCO, J. D.; LIMA, A. D.; SANTOS JUNIOR, O. F.; NASCIMENTO, R. M. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de esgoto com vistas ao reuso na indústria cerâmica**. AIDIS; Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Sección Uruguay. Rescatando antiguos principios para los nuevos desafíos del milenio. Montevideo, AIDIS, 2007.

JORDÁN, M. M; ALMENDRO-CANDEL, M. B.; ROMERO, M.; RINCÓN, J. M. **Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tiles bodies**. Applied Clay Science, Maio de 2005: p. 219-224.

LEITE, J. Y. P.; ARAÚJO, A. L. C; ARAÚJO, F. S. D.; INGUNZA, M. P. D.; SANTOS JUNIOR, O. F. **Characterization of sewage sludge and clays for application in ceramick bricks**. Sustainable development indicators in the minerals industry. Vol. 4. Aachen: VGE, 2005. p. 283-291.

LIEW, A. G.; IDRIS, A.; SAMAD, A. A.; WONG, C. H. K.; JAAFAR, M. S.; BAKI, A. M. **Reusability of sewage sludge in clay bricks**. Journal of Material Cycles and Waste Management (Springer Japan), Vol. 6, Nº 1, Março (2004): p. 41-47.

LIMA, E. P.; RODRIGUES, W. **Cerâmica vermelha da região central do Tocantins**. Estudo de Atividade Empresarial, Palmas: SEBRAE, 2004.

MARINE BIO. Disponível em: <http://marinebio.org/Oceans/OceanDumping.asp>. Acesso em 20 jan. 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico: setor de transformação de não metálicos.** Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral. 2007.

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

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. **As matérias-primas cerâmicas. Parte 1 - O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos**. 2001.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando a sua utilização em cerâmica vermelha**. Edição: Anselmo Ortega Boschi. Revista Cerâmica Industrial (ABCERAM), n. 50 (2004): p. 324-330.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. **Importância da composição granulométrica de massas para cerâmica vermelha**. Revista Cerâmica Industrial, n. Janeiro - Abril de 1997.

PROSAB. **Manual prático para compostagem de biossólidos**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

QUINTANA, L. M. H.; SOARES, J. M. D.; FRIZZO, P. P.; BOHRER, L. D. **Utilização da cinza de casca de arroz na produção de cerâmica vermelha**. 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 1999.

RAMIRES, M. V. V. **Incorporação do resíduo (Lodo) da ETA de São Leopoldo - RS nas misturas de argilas para a fabricação de componentes cerâmicos conformados por prensagem**. 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2001.

REBMANN, M. S.; COELHO, H. P. T.; SALVETTI, A. R. **Efeito da adição de filler de basalto em massa cerâmica vermelha**. 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2001.

SANTOS, A. D. **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto de região metropolitana de São Paulo**. São Paulo: USP, 2003.

SANTOS, I. S. S.; RAMIRES, M. V. V.; KAZMIERCZAK, C. S.; SILVA, H. C.; KERN, A. P; CAMARGO, S. A. **Reciclagem do resíduo (Lodo) da estação de tratamento de água do município de São Leopoldo - RS, visando a produção de componentes cerâmicos**. 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2001.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª Edição. Vol. I. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1989.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, A. R.; SANTOS, G. T. A.; DIAS, F. C. **Caracterização de argilas usadas pela indústria cerâmica vermelha de Martinópolis - SP e efeito da incorporação de resíduo sólido nas suas propriedades cerâmicas**. 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2005.

VIEIRA, C. M. F.; ANDRADE, P. M.; MACIEL, G. S.; VERNILLI JUNIOR, F.; MONTEIRO, S. N. **Incorporation of fine steel sludge waste into red ceramic**. Materials Science & Engineering, Abril de 2006: p. 142-147.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; DUALIBI FILHO, J. **Formulação de massa de revestimento cerâmico com argilas plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP)**. Revista Cerâmica Industrial, n. 6 (Novembro/Dezembro 2001): p. 43-49.

VIEIRA, C. M. F.; PEÇANHA, L. A.; MONTEIRO, S. N. **Efeito da incorporação de resíduo de serragem de granito em massa de cerâmica vermelha**. Revista Vértices (CEFET - Campos), Set - Dez 2003.

WENG, C.; LIN, D.; CHIANG, P. **Utilization of sludge as brick materials**. Advances in Enviromental Research, 2003: 679-685.

WERTHER, J., OGADA, T. **Sewage sludge combustion**. Progress in energy and combustion science, 1999: p. 55-116.

WILLIAMS, P. T. **Waste treatment and Disposal**. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 1998.

ZANDONADI, A. R. **Processo Cerâmico.** São Paulo: IPT, 1988.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo