



**Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental**

Francisco José Ribeiro Cruz

**UTILIZAÇÃO DE CINZA DE AVELOZ DE FORNOS CERÂMICOS
PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS E TELHAS**

**Caruaru
2012**

Francisco José Ribeiro Cruz

**UTILIZAÇÃO DE CINZA DE AVELOZ DE FORNOS CERÂMICOS
PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS E TELHAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco-Centro Acadêmico do Agreste para obtenção do Título de Mestre.

Orientador (a) Prof. Érika Pinto Marinho
Co-orientador (a) Prof. Sávia Gavazza dos Santos

**Caruaru
2012**

Catálogo na fonte
Bibliotecário Elilson Rodrigues Góis CRB4 - 1687

C957u Cruz, Francisco José Ribeiro.
Utilização da cinza de aveloz de fornos cerâmicos para a produção de tijolos e telhas / Francisco José Ribeiro Cruz. – Caruaru: O autor, 2012
76f.: il. ; 30 cm.

Orientador: Erika Pinto Marinho.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2012.
Inclui bibliografia.

1. Cerâmica vermelha - Indústria - Brasil, Nordeste. 2. Cinzas de forno. 3. Reaproveitamento. 4. Massa cerâmica industrial. I. Marinho, Erika Pinto (orientadora). II. Indústria de Cerâmica Vermelha em Caruaru (PE). III. Título.

628 CDD (23.ed.)

UFPE (CAA 2012-26)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**UTILIZAÇÃO DE CINZA DE AVELOZ DE FORNOS CERÂMICOS PARA
PRODUÇÃO DE TIJOLOS E TELHAS**

defendida por

FRANCISCO JOSÉ RIBEIRO CRUZ

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 27 de fevereiro de 2012

Érika Pinto Marinho – PPGECAM/UFPE
(orientadora)

Sávia Gavazza dos Santos Pessôa – PPGECAM/UFPE
(co-orientadora)

Osmar Souto Baraúna – ITEP
(examinador externo)

Ana Cecília Vieira da Nóbrega – PPGECAM/UFPE
(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

A minha vida sempre foi repleta de pessoas especiais, anjos da guarda que iluminam o meu cotidiano de diferentes formas. São essas pessoas que merecem o meu eterno agradecimento.

A Deus, por ter proporcionado a convivência com essas pessoas que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus pais, Francisco Chagas e Terezinha Ribeiro, que doaram uma parte de si para que eu fosse o que eu sou.

À minha orientadora e professora Érika Pinto Marinho, por não ter medido esforços para a concepção deste trabalho, pela amizade, apoio, paciência e compreensão.

À minha co-orientadora e professora Sávia Gavazza, pela atenção e pela ajuda, principalmente nas correções desse trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, que foram fundamentais para o direcionamento das atividades desenvolvidas.

Às técnicas do Laboratório de Química (LQ), Amanda e Claudete e ao técnico do Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA), Luiz Lucena, pelo apoio.

À Elaine Patrícia do Departamento de Química Fundamental (DQF), pela assistência necessária na análise de MEV.

À Tarcyla de Andrade do Departamento de física (DF), pela colaboração na análise de DRX.

À Doutoranda Elaine Cavalcante do DQF (Departamento de Química Fundamental), que não poupou esforços para me ajuda análise de TG.

Ao secretário do PPGECAM Samuel Kisseberg pela agilidade e eficiência.

A Marcos Soares, pela receptividade e fornecimento das matérias-primas.

Ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco, em especial ao Osmar Baraúna e José Roberto, que tiveram um papel fundamental para a realização deste trabalho.

Aos colegas de mestrado, em especial ao Alexsandro, Manuela e Mariah, que sempre estiveram presentes com suas opiniões, e aos demais colegas do curso que, de uma forma ou de outra, contribuíram com este trabalho.

Aos meus colegas de trabalho Wellington Medeiros e Viviane Siqueira, pela parceria, confiança, incentivo e amizade.

A todos, que direta, ou indiretamente, contribuíram para que eu pudesse concluir este trabalho.

RESUMO

A reciclagem e incorporação de resíduos industriais na obtenção de novos produtos têm se intensificado, nos últimos anos, em todo o planeta. Assim como a maioria dos setores produtivos, a indústria de cerâmica também busca alternativas para a redução dos problemas ambientais e à economia. Nesse sentido, as principais questões que se apresentam dentro deste setor são a extração da argila (matéria-prima cerâmica), a emissão de poluentes e os combustíveis utilizados e como eles são empregados. O objetivo desse trabalho foi investigar composições de massas cerâmicas para a obtenção de blocos com adição de cinza gerada em um forno intermitente comum pertencente a uma indústria cerâmica vermelha de Caruaru – PE, que apresentassem características tecnológicas adequadas ao uso na construção civil. As matérias-primas utilizadas foram uma massa cerâmica constituída por uma mistura argilosa usada em uma olaria de médio porte e cinzas de lenha de aveloz obtida na mesma olaria. Após a caracterização da matéria-prima por granulometria, difração de raios X, análise termogravimétrica e limites de consistência, foram feitas incorporações com 5%, 10% e 15% de cinza, em peso, em relação à massa cerâmica industrial. Os corpos de prova foram extrudados utilizando uma maromba MVIG – 05, e boquilha com as dimensões 2 cm X 1 cm X 20 cm (LxAxC) e queimados nas temperaturas de 850°C, 950°C e 1050°C. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de desempenho tecnológico, tais como: retração linear, absorção de água e tensão de ruptura à flexão, além de análise microestrutural através de MEV. Foi observado que a adição de cinzas de aveloz comprometeu o desenvolvimento de desempenho dos produtos cerâmicos, resultando no aumento da retração linear, aumento de absorção de água e diminuição da resistência mecânica dos corpos de prova estudados. Este efeito é atribuído à presença de carbonato de cálcio nas cinzas de aveloz, confirmada por resultados de difração de raios. O carbonato de cálcio presente nas cinzas sofre decomposição entre 800 °C e 915 °C, resultando em aumento da formação de poros fragilizando a microestrutura. Ainda assim, quando a temperatura de trabalho é mantida em 950 °C, é possível substituir até 15% da massa cerâmica industrial pelo resíduo estudado para a fabricação de tijolos, ou substituir até 5% da massa cerâmica industrial para a fabricação de telhas.

Palavras-chave: Cinzas de forno. Massa cerâmica industrial. Cerâmica vermelha. Reaproveitamento.

ABSTRACT

In the last years the recycle and incorporation of industrial wastes in new products become intense in the world. As most industries of productive sector the ceramic industry also demand alternatives to deal with environmental problems in association with the economy. In this way, some questions arise in this sector like clay extraction (raw material), pollutants emission and the fuel use and sources. The objective of this work was to study the influence of the addition of ash (from ceramic industry) to the ceramic brick composition and the technological behavior for the bricks application in the civil construction. The materials used were the clay mixture whose composition had been used in a medium size pottery and the ash from Aveloz firewood obtained in the same pottery. After characterization of the raw material (particle size, x-ray diffraction, thermo gravimetric and limit consistency analysis) incorporations of 5%, 10% and 15% (in proportion of clay weight) of ash were evaluated to the ceramic formulation. The specimen were extruded using a cowshed (MVIIG-05) and a holder with dimensions of 2 cm X 1 cm X 20 cm (WxHxL) and burned at 850 °C, 905 °C and 1050 °C. It was submitted to technological behavior essays: linear retraction, water absorption, bending test and micro structural analysis by scanning electron microscopy (SEM). It was observed that the ash addition compromised the behavior of the ceramic products. It increased the linear retraction and water absorption and promoted loss of mechanical resistance. This effect is attributed to the calcium carbonate usually present at aveloz ash, confirmed in x-ray diffraction results. Calcium carbonate is decomposed in temperatures between 800 °C and 915 °C leaving pores in the microstructure. Nevertheless, maintaining the working temperature in 950 °C it is possible to replace until 15% and 5% of the clay by waste, respectively, in the ceramic formulation for bricks and tiles production.

Keywords: Ash oven. Industrial clay. Red ceramic. Reuse.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa. | 37 |
| Figura 2 - Ensaio de determinação da retração linear de corpos de prova cerâmico. (a) medição do corpo-de-prova antes da queima; (b) medição do corpo-de-prova depois da queima. | 43 |
| Figura 3 - Corpo-de-prova submerso em água fervida e destilada. | 44 |
| Figura 4 - Ensaio de tensão de ruptura a flexão. | 46 |
| Figura 5 - Curvas granulométricas da massa cerâmica industrial com defloculante (em azul) e sem defloculante (em vermelho). | 48 |
| Figura 6 - Curvas granulométricas da cinza com defloculante (em azul) e sem defloculante (em vermelho). | 49 |
| Figura 7 - Classificação ternária do diagrama de Winkler baseado na distribuição granulométrica de grãos e partículas em relação ao uso prático da massa cerâmica industrial. (A) Materiais de qualidade com dificuldade de produção; (B) telhas; (C) tijolos furados; (D) tijolos maciços. | 50 |
| Figura 8 - Difratoograma de Raios-X da massa cerâmica industrial utilizada nas formulações cerâmicas. | 52 |
| Figura 9 - Difratoograma de Raios-X da cinza utilizada nas composições das massas cerâmicas. | 53 |
| Figura 10 - Análise termogravimétrica (TG) da massa cerâmica industrial. | 54 |
| Figura 11 - Corpos de prova queimados em todas as temperaturas estudadas (de cima para baixo: 850 °C, 950 °C e 1050 °C). | 57 |
| Figura 12 - Retração linear de queima dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas. | 57 |
| Figura 13 - Absorção de Água dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas. | 59 |
| Figura 14 - Porosidade aparente dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas. | 60 |
| Figura 15 - Massa Específica dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas. | 61 |
| Figura 16 - Tensão de Ruptura á Flexão dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas. | 63 |
| Figura 17 - Microscopia por MEV da superfície dos corpos de prova cerâmicos queimados a 950°C. (a) massa cerâmica (referência) aumentada 1500x; (b) massa cerâmica (referência) aumentada 5000x; (c) 15% de cinza aumentada 1500x; (d) 15% de cinza aumentada 5000x. ... | 65 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Composição das massas cerâmicas com cinzas. | 41 |
| Tabela 2 – Composição química da massa cerâmica e da cinza utilizada no trabalho. | 47 |
| Tabela 3 – Fração granulométrica ideal para os produtos de cerâmica vermelha, segundo Winkler (1954)..... | 51 |
| Tabela 4 – Percentuais das frações granulométricas das massas cerâmicas estudadas. | 51 |
| Tabela 5 - Limites de consistência com suas respectivas classificações segundo Bruguera (1986)..... | 55 |
| Tabela 6 - Avaliação da aplicabilidade de corpos de prova cerâmicos contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas..... | 64 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--------------|---|
| AA | Absorção de água |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AIA | Avaliação de Impacto Ambiental |
| ANIC | Associação Nacional da Indústria Cerâmica |
| ATG | Análise Termogravimétrica |
| DRX | Difração de Raios X |
| EIA | Estudo de Impacto Ambiental |
| FRX | Fluorescência de raios X |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| GN | Gás Natural |
| IP | Índice de Plasticidade |
| LI | Licença de Instalação |
| LL | Limite de Liquidez |
| LO | Licença de Operação |
| LP | Licença Previa |
| LP | Limite de Plasticidade |
| MEA | Massa específica aparente |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| PA | Porosidade aparente |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PRAD | Plano de Recuperação de Área Degradada |
| RIMA | Relatório de Impacto Ambiental |
| RL | Retração Linear |
| SENAI | Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial |
| TRF | Tensão de Ruptura à Flexão |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 - INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 – OBJETIVOS | 13 |
| 2.1 – Objetivo Geral | 13 |
| 2.2 – Objetivos Específicos | 13 |
| 3 - REVISÃO DE LITERATURA | 14 |
| 3.1 – Indústria de cerâmica vermelha | 14 |
| 3.1.1 – Indústria de cerâmica vermelha no Brasil | 15 |
| 3.1.2 – Cerâmica estrutural (vermelha) | 16 |
| 3.2 – Produção de cerâmica | 17 |
| 3.2.1 – Etapas da produção de cerâmicas | 18 |
| 3.3 – Tipos de combustível usados nas cerâmicas | 19 |
| 3.4 – Legislação ambiental | 20 |
| 3.5 – Resíduos sólidos | 21 |
| 3.6 – Cinza | 23 |
| 3.6.1 – Reaproveitamento de cinza | 23 |
| 3.7 – Caracterização das argilas | 26 |
| 3.7.1 – Análise química | 26 |
| 3.7.2 – Análise mineralógica | 27 |
| 3.7.3 – Limite de liquidez (LL) | 28 |
| 3.7.4 – Limite de plasticidade (LP) | 28 |
| 3.7.5 – Índice de plasticidade (IP) | 28 |
| 3.7.6 – Análise termogravimétrica (TG) | 29 |
| 3.7.7 – Análise térmica diferencial (ATD) | 29 |
| 3.8 – Propriedades tecnológicas | 30 |
| 3.8.1 – Retração linear (RL) | 30 |
| 3.8.2 – Massa específica aparente (MEA) | 30 |
| 3.8.3 – Absorção de água (AA) | 31 |
| 3.8.4 – Porosidade aparente (PA) | 31 |
| 3.8.5 – Tensão de ruptura a flexão (TRF) | 32 |
| 3.9 – Análise microestrutural | 32 |
| 3.10 – Qualidades nos produtos cerâmicos | 33 |
| 3.11 – Defeitos nos produtos cerâmicos | 34 |
| 4 - MATERIAIS E MÉTODOS | 36 |
| 4.1 – Materiais | 36 |
| 4.1.1 – Massa cerâmica industrial | 36 |
| 4.1.2 – Cinza de lenha | 36 |
| 4.2 – Métodos | 36 |
| 4.2.1 – Caracterização das matérias primas | 37 |
| 4.2.1.1 - Análise química | 38 |
| 4.2.1.2 – Análise granulométrica | 38 |
| 4.2.1.3 – Análise mineralógica (DRX) | 38 |
| 4.2.1.4 – Análise termogravimétrica | 38 |

| | |
|---|----|
| 4.2.1.5 – Limites de consistência..... | 38 |
| 4.2.2 – Elaboração das composições | 40 |
| 4.2.3 – Ensaios de desempenho tecnológico..... | 42 |
| 4.2.3.1 – Retração linear..... | 42 |
| 4.2.3.2 – Absorção de água | 43 |
| 4.2.3.3 – Porosidade aparente..... | 44 |
| 4.2.3.4 - Massa específica aparente (MEA)..... | 45 |
| 4.2.3.5 – Tensão de ruptura à flexão..... | 45 |
| 4.2.4 – Caracterização microestrutural (MEV)..... | 46 |
| 5 – RESULTADOS..... | 47 |
| 5.1 – Análise granulométrica..... | 48 |
| 5.2 – Análise mineralógica (DRX)..... | 51 |
| 5.3 – Análise termogravimétrica (TG)..... | 54 |
| 5.4 – Limites de consistência..... | 54 |
| 5.5 – Ensaios de desempenho tecnológico..... | 56 |
| 5.5.1 – Retração linear de queima | 57 |
| 5.5.2 – Absorção de água | 58 |
| 5.5.3 – Porosidade aparente..... | 60 |
| 5.5.4 – Massa específica aparente..... | 61 |
| 5.5.5 – Tensão de ruptura a flexão..... | 62 |
| 5.6 – Caracterização microestrutural (MEV)..... | 65 |
| 6 – CONCLUSÃO | 67 |
| 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 69 |
| 8 - REFERÊNCIAS..... | 70 |

1 - INTRODUÇÃO

A Região do Agreste de Pernambuco, mais precisamente a Micro-região do Vale do Ipojuca, possui um importante pólo de indústria cerâmica voltado à produção de telhas e tijolos e, conseqüentemente, é uma grande produtora de cinzas, resultantes da queima de material vegetal, principal matriz energética utilizada no local. Nesta região, encontram-se cerca de 50 (cinquenta) indústrias de cerâmicas vermelhas. Em visita a algumas destas cerâmicas, estima-se que o gasto de madeira por cada uma é, em média, 720 m³/mês. A precisão do volume de cinza resultante de processo produtivo fica difícil de ser alcançado em função de: qualidade/origem da madeira, (aveloz, angico, algaroba, etc.). Segundo Osaki (1991), cerca de 1% do material vegetal transforma-se em cinzas, o que gera, nesta perspectiva, aproximadamente 360 m³/mês de cinzas em toda região do agreste pernambucano.

Esses resíduos são oriundos do processo de queima de lenha. Neste processo, ocorre a incineração da lenha sobre grelhas de fornalhas, onde o calor é conduzido até o teto do forno, atravessando assim o produto a ser cozido. Os gases são eliminados pelas chaminés, as quais são interligadas por dutos inferiores, e as cinzas ficam acondicionadas embaixo das grelhas. Normalmente, o ciclo de queima da lenha em forno cerâmico tem a duração de cinco a sete dias e, pelo fato da combustão ser incompleta, são eliminados poluentes perigosos e prejudiciais ao meio ambiente, o que causa a poluição do ar (PROGESC, 1995).

O destino da cinza que emerge dos fornos de queima do tijolo e da telha do agreste pernambucano hoje em dia não tem uma destinação única. Parte vai para vala comum ou céu aberto sem aproveitamento nenhum. Parte vai para servir de adubo orgânico nas áreas de plantio de hortifrutigranjeiros, mas não se avista ainda nenhuma aplicação desse resíduo industrial para a fabricação de tijolos na região.

As cinzas de lenha constituem um tipo de resíduo, que pode conter inclusive metais que, pode causar poluição do ar e ser responsável por graves problemas respiratórios. O processo de solidificação/estabilização vem sendo usado como opção de tratamento de uma variedade de resíduos sólidos, com o intuito de imobilizar os elementos contaminantes presente nos mesmos (OSWALD, 2008).

A solidificação consiste em encapsular resíduos perigosos dentro de uma matriz sólida de grande integridade estrutural; e a estabilização consiste em estabilizar os resíduos perigosos e transformá-los em materiais menos poluentes. A argila vem sendo

muito utilizada como uma matriz sólida devido principalmente as suas características, como: boa resistência mecânica, capacidade de suportar altas temperaturas e boa estabilidade (HEREK, 2005).

A incorporação das cinzas da queima de madeira na indústria de cerâmica vermelha traz uma série de vantagens, como: redução da poluição do ar, redução da poluição do solo, aumento de vida útil da jazida, e ainda redução de custos de recomposição da área com vegetação nativa.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo principal desenvolver formulações cerâmicas obtidas com a participação de cinzas provenientes de queima de lenha utilizada nos fornos intermitente comum de uma cerâmica de Caruaru – PE, e avaliar se as características tecnológicas dos produtos obtidos eram adequadas para fabricação de tijolos cerâmicos destinados à construção civil.

2 – OBJETIVOS

2.1 – Objetivo Geral

Avaliar a influência da incorporação de cinza de Aveloz gerada em uma indústria cerâmica de Caruaru – PE nas características tecnológicas de massas cerâmicas destinadas à fabricação de tijolos e telhas.

2.2 – Objetivos Específicos

- Caracterizar a cinza gerada pela indústria cerâmica do agreste pernambucano e avaliar se suas características físico-químicas são adequadas para a incorporação em tijolos cerâmicos e telhas;
- Avaliar qual o percentual de cinzas (5%, 10% e 15%) que pode ser introduzido nas composições da massa cerâmica industrial para a fabricação de tijolos e telhas;
- Avaliar a variação de absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, retração linear de secagem e queima e tensão de ruptura à flexão dos corpos de prova, conforme as normas da ABNT;
- Caracterizar microestruturalmente os corpos de prova sinterizados com e sem cinza;
- Avaliar se as propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas com substituição parcial da mistura argilosa pelas cinzas são tecnicamente compatíveis com os padrões recomendados para a confecção de tijolos e telhas.

3 - REVISÃO DE LITERATURA

3.1 – Indústria de cerâmica vermelha

Cerâmica, palavra originada do grego “keramos”, quer dizer coisa queimada, o que vem a indicar que as desejáveis propriedades desses materiais mais comumente são encontradas mediante processo de tratamento térmico e em altas temperaturas, o que veio a ser denominado queima (NASCIMENTO, 2007).

Então, é basicamente utilizando-se dessa tecnologia (queima) que surgiu e se mantém a indústria cerâmica, a qual pode ser conceituada como uma atividade de produção de artefatos a partir da argila, que se torna muito plástica e fácil de moldar quando umedecida. E após moldada, a peça é submetida a uma secagem para retirar a maior parte da água e em seguida é condicionada a altas temperaturas que lhe atribuem rigidez e resistência, mediante a fusão de certos componentes da massa.

Pesquisas confirmam a cerâmica como a mais antiga das indústrias, sendo o material artificial mais antigo produzido pelo homem, com sua origem a partir do momento em que ele passou a utilizar-se do barro endurecido pelo fogo, antes mesmo da Idade da Pedra Polida ou período Neolítico, algo em torno de 26.000 a.C. até 5.000 a.C., não existindo, entretanto, um consenso sobre como isto ocorreu (ANFACER, 2011).

A maior parte das culturas acabou por desenvolver estilos próprios, à medida que o tempo passava novas tendências surgiam e foram consolidadas, demonstrando o crescimento no aprimoramento artístico daquele povo. Tamanha é a importância desse registro que, a partir dele, pode-se situar o estado cultural de uma civilização através do estudo dos artefatos cerâmicos que produziam. Por ser um material muito resistente, a cerâmica é frequentemente encontrada em escavações arqueológicas, e as primeiras que se tem notícia são da Pré-História: vasos de barro, sem asa, que tinham cor de argila natural ou eram escurecidas por óxidos de ferro (ANFACER, 2011).

Atualmente, o setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos. O Brasil conta com todos esses segmentos,

apresentando suas variações no grau de desenvolvimento e capacidade de produção (ANICER, 2010).

3.1.1 – Indústria de cerâmica vermelha no Brasil

No Brasil, a cerâmica tem sua origem na cultura indígena. Estudos arqueológicos indicam a presença de uma cerâmica mais simples, que ocorreu na Ilha de Marajó por volta de 5.000 anos atrás, o índio conseguiu criar uma cerâmica de valor, que dá a impressão de superação dos estágios primitivos da Idade da Pedra e do Bronze.

Sendo assim, o conhecimento acerca da produção de cerâmica não chegou ao Brasil com os portugueses, nem mesmo veio com os escravos. Os índios aborígenes já tinham firmado a cultura do trabalho em barro antes da chegada de Cabral. Por isso, os colonizadores portugueses, instalando as primeiras olarias nada de novo trouxeram, porém, estruturaram e concentraram a mão-de-obra (ANFACER, 2011).

Atualmente o Brasil é a 8ª maior economia do planeta na classificação do FMI (Fundo Monetário Internacional), apresentando um PIB (Produto Interno Bruto) de R\$ 3,675 trilhões em 2010, segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas). O país também é detentor do quinto maior território do mundo com mais de 8,5 milhões de quilômetros quadrados e uma população em torno de 190 milhões de habitantes, ainda de acordo com os dados deste órgão.

O Brasil é um país com boa competitividade no mercado global, contando com um sofisticado setor tecnológico, um parque industrial diversificado e moderno, um setor de agronegócios com grande produtividade e altamente competitivo, possui ainda um qualificado sistema de serviços e desenvolve negócios com praticamente todas as nações do mundo (ANFACER, 2010).

No campo da indústria de cerâmica para revestimento, o país é o segundo maior produtor e consumidor mundial. Só em 2010 foram produzidos 753,5 milhões de metros quadrados, para uma capacidade instalada de 875,2 milhões de metros quadrados. As vendas totais atingiram 756,8 milhões de metros quadrados, sendo 699,6 milhões vendidos no mercado interno e 57,2 milhões exportados (ANFACER, 2010).

Já a indústria de cerâmica vermelha brasileira é a principal fornecedora de materiais para alvenarias, coberturas e saneamento. Sendo bastante pulverizada e composta principalmente de micro e pequenas empresas, ela está presente em todos os 27 estados da nação e representa 4,8% da indústria da Construção Civil, gerando cerca

de 300 mil postos de trabalho diretos e 1,25 milhões indiretos. De acordo com o IBGE, o setor é constituído por 7.430 empresas, as quais são responsáveis por um faturamento superior a R\$ 6 bilhões ao ano e por mais de 90% das alvenarias e coberturas utilizadas no país. Nessas empresas são produzidos por mês mais de quatro bilhões de blocos de vedação e estruturais, e 1,3 bilhões de telhas (ANICER, 2010).

Segundo a ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica), em 2009, considerando-se o consumo igual à produção (76 bilhões de peças), foi registrado um consumo médio per capita de 384 peça/habitante, geograficamente distribuído em: Região Norte 247 pç/hab; Nordeste 312; Centro-Oeste 381; Sudeste 395 e Sul 657 pç/hab.

Apesar dos elevados números apresentados acima, a produtividade média do segmento oleiro cerâmico brasileiro em 2009 foi de 15,8 mil peças/operário/mês, com algumas variações regionais. Esse dado indica uma diferença de desempenho de produtividade em relação aos países desenvolvidos, mostrando a necessidade da modernização do segmento no Brasil.

Frente a esse atraso tecnológico no padrão produtivo brasileiro, uma pequena parte das empresas de cerâmica vermelha utiliza-se de processos produtivos com tecnologias mais atuais, como sistemas semi-automáticos de carga e descarga e fornos túneis. E algo em torno de 1% das empresas já conquistou a certificação e pelo menos 5% está em processo (ANICER, 2009).

3.1.2 – Cerâmica estrutural (vermelha)

A classificação dos grupos cerâmicos pode ser realizada com base no emprego dos seus produtos, natureza de seus constituintes, características texturais do biscoito (massa base), além de outras características cerâmicas ou técnico-econômicas (MOTTA, ZANARDO e CABRAL, 2001).

A matéria-prima da cerâmica vermelha, a argila, destaca-se como a 4ª maior produção do setor mineral, posicionando-se abaixo apenas da produção de ferro (368,8 Mt), e de agregados, areia (300 Mt) e brita (234 Mt). A partir da produção estimada de 76 bilhões de peças cerâmicas em 2009, considerando a massa média de 2,0 kg/peça, pode-se estimar a utilização de 152 milhões de toneladas de argila (ANICER, 2009).

A argila é responsável pela cor vermelha da cerâmica estrutural, sendo essa cor o principal aspecto para sua caracterização. Ela também apresenta como características

compostos metálicos e não metálicos, tais como oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio, que se arranjam em estruturas tridimensionais no estado iônico e cujo interesse se encontra no peso, resistência mecânica, resistência ao desgaste e na absorção de água e duração (NASCIMENTO, 2007). Alguns exemplos de produtos no segmento da cerâmica vermelha são: tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais, agregados leve de argila expandida e outros (MOTTA, ZANARDO e CABRAL, 2001).

O fato da fabricação dessa cerâmica ser possível através de altas temperaturas torna-se muito dispendioso aplicar métodos tradicionais de vazamento ou fusão, somente sendo viável mediante processo de compactação ou extrusão pós o aquecimento a temperaturas apropriadas.

3.2 – Produção de cerâmica

Dois fatores são determinantes na localização geográfica das fábricas de cerâmica, a distância da jazida (devido à grande quantidade de matéria-prima processada) e a proximidade dos centros consumidores (em função dos custos de transporte). Esses fatores conduzem, muitas vezes, à conformação de aglomerações produtivas.

Quanto à mineração de argila, ela tem a predominância de minas de pequeno porte, de 1.000 a 20.000 t/mês, e por esse material apresentar baixo valor agregado e alto custo de transporte, usualmente as empresas do setor possuem reservas e jazidas próprias. Porém, algumas modificações vêm ocorrendo e começam a surgir a terceirização do suprimento dessa matéria-prima. A extração da argila é uma atividade que gera significativos impactos ambientais, conta com poucos funcionários por mina e o diesel é o principal combustível utilizado nos equipamentos.

Após esse processo, é realizado o sazonalamento, o qual consiste na estocagem da argila por um período não inferior a seis meses, objetivando principalmente a melhoria da plasticidade, lavagem dos sais solúveis, decomposição da matéria orgânica e diminuição das tensões causadas pelas quebras das ligações químicas. Depois desse período a matéria-prima está pronta para o processo de fabricação da cerâmica estrutural, contendo ele, basicamente 4 etapas: preparação da massa, conformação (moldagem) das peças, secagem e queima. Para obtenção de um produto de qualidade e

minimização de defeitos e perdas, é necessário um rigoroso acompanhamento em cada uma delas (ARRUDA e MARIBONDO, 2007).

3.2.1 – Etapas da produção de cerâmicas

- Preparação da massa

O preparo da massa, em geral, é feito empiricamente, com uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, para propiciar boa trabalhabilidade e resistência mecânica após queima. Na maior parte das vezes a massa é uma mistura de argila “gorda”, que é caracterizada pela alta plasticidade e granulometria fina, com argila “magra”, menos plástica e com granulometria grossa, rica em quartzo, que funciona como um redutor da plasticidade. Em seguida, a massa é umedecida em teor médio de 20% e homogeneizada para na sequência fazer a conformação dos produtos cerâmicos. Nessa etapa, utilizam-se os seguintes equipamentos: moinho, caixão alimentador, destorroador ou desintegrador, misturador e laminador (MOTTA *et al.*, 2001).

- Conformação das peças

Os métodos industriais utilizados para conformação de blocos e telhas são, respectivamente, a extrusão e a prensagem. Mesmo gerando produtos de menor valor, a extrusão é o método mais utilizado na indústria de cerâmica estrutural, devido ao seu menor custo. A prensagem é um método mais caro, que apenas é realizado em alguns tipos de telhas com maior valor agregado (ARRUDA e MARIBONDO, 2007).

- Secagem

Após a conformação, ou seja, com o produto moldado, tem início a etapa de secagem, sendo este processo de grande importância na fabricação da cerâmica estrutural, exigindo cuidados especiais para garantir que a água contida nos produtos seja lenta e uniformemente eliminada por toda a massa cerâmica, evitando assim, possíveis defeitos na peça, tais como trincas, empenamentos ou quebras (NORTON, 1973). Essa operação pode ser feita de dois modos:

Secagem natural: ao ar livre, próxima aos fornos para aproveitamento do calor circulante, por um período de 6 a 12 dias, dependendo da umidade relativa do ar no local de secagem.

Secagem artificial: feita em secadores estáticos, contínuos ou semi-contínuos, com a introdução controlada de ar quente proveniente das fornalhas ou fornos.

- Queima

A queima é a etapa mais importante de todo processo produtivo. É nela que se manifestam várias propriedades das argilas através das transformações físicas, químicas e mecânicas causadas pela ação da temperatura do forno. Essa operação apresenta quatro fases:

- a) quente ou preaquecimento: é caracterizado por um aquecimento gradual para retirada de água residual, sem provocar defeitos na peça cerâmica causados por contrações diferenciais durante a expulsão da umidade remanescente, num período de 8 a 13 horas, chegando até 650°C (SENAI, 2006);
- b) fogo forte ou caldeamento: que se inicia por volta de 650°C e pode ser elevada em maior ritmo até 950°C ou 1000°C. É nessa fase que se verificam as reações químicas que proporcionam ao corpo cerâmico as características de dureza, estabilidade, resistência aos vários agentes físicos e químicos, como também a coloração pretendida (SENAI, 2006);
- c) patamar: a temperatura máxima de queima é mantida por um determinado período de tempo. Dessa forma, a câmara aproxima ao máximo o gradiente de temperatura por todo o forno; (SENAI, 2006);
- d) resfriamento: visando evitar ocorrência de trincas, ele é realizado de forma gradual e cuidadosa através da chaminé ou do aproveitamento de calor para os secadores, num período em torno de 38 a 50 horas (SENAI, 2006).

3.3 – Tipos de combustível usados nas cerâmicas

O uso da lenha como fonte de energia para obtenção do fogo, utilizado na iluminação, aquecimento, preparo de alimentos e proteção contra animais, é prática do homem desde os tempos mais remotos.

Mesmo após milhares de anos, na matriz energética brasileira, por exemplo, 10% da produção de energia primária é proveniente da lenha, podendo ser ela de origem nativa ou de reflorestamento (FIERN, 2001).

Na indústria de cerâmicas, a madeira é um dos principais combustíveis, sendo utilizada na queima dos produtos, ou quando se necessita de calor para secar artificialmente as peças extrudadas, antes da queima. Outros tipos de combustíveis podem substituir a lenha na realização dessas operações, é o caso do óleo diesel, carvão, gás natural (GLP), dentre outros. Mas como em determinadas regiões, devido à sua

abundância, o custo da lenha é inferior aos demais, ela se torna a principal fonte de calor das cerâmicas dessas áreas.

Embora a utilização da madeira ainda seja considerada um processo degradante, não só pelo corte das árvores e pela grande produção de cinzas, mas também pela queima do produto que libera gás carbônico na atmosfera, no segmento da indústria de cerâmica vermelha, o principal combustível ainda é a lenha nativa, a qual participa com 50% do material queimado, seguida de resíduos de madeira, 40%, sendo estes distribuídos entre cavaco, serragem, briquetes e 10% de outros resíduos. No Brasil, 96,4% das empresas desse setor fazem uso de lenhas e resíduos de madeiras. Estima-se que o consumo nacional de lenha nativa corresponda a 8,9 milhões de m³/ano, valor equivalente a uma área de extração em floresta plantada de 1.113 km² aproximadamente 4% da atual área reflorestada no país (CAMPOS, 2001 e MARCOLIN, 2006).

A busca pela sustentabilidade energética implica em um aumento no uso de lenha de reflorestamento, o que geraria um excedente de biomassa para comercialização de madeira no setor produtivo de cerâmica vermelha (ANICER, 2009).

No momento, uma alternativa que está em evidência para substituição do uso da lenha é o Gás Natural (GN), mas o seu preço em relação à madeira ainda é um empecilho. Mesmo sendo disponível em muitas regiões produtoras de cerâmica, o custo do GN em relação ao custo total e ao preço final praticado pelas empresas, impede uma maior difusão do seu uso nos processos produtivos. Como resultado, os baixos preços praticados pelas cerâmicas e sua baixa rentabilidade desestimulam a realização de investimentos em melhorias técnicas na produção, incluindo-se os gastos com a conversão para o GN (CASTRO e PACHECO, 2005).

3.4 – Legislação ambiental

A indústria de cerâmicas, assim como outros setores industriais, gera impactos negativos ao meio ambiente, já que nela ocorre emissão na atmosfera de pós e gases, descarga de águas residuais, geração de rejeitos e resíduos sólidos, além da exploração da argila.

No Brasil, o primeiro dispositivo legal com o objetivo de reduzir os impactos ambientais negativos causados pela mineração, categoria na qual se enquadra a exploração da argila, foi a Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981, que, através do Decreto Federal n.º 88.351, instituiu o Licenciamento Prévio (LP), Licenciamento de

Instalação (LI) e Licenciamento de Operação (LO). A partir de 1986, com a resolução do CONAMA n.º 01, estabeleceram-se as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para o uso e implementação da Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) como instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente (SILVA, VIDAL e PEREIRA, 2001).

Já em 1989, o governo editou o Decreto Federal n.º 97.632, no qual resolveu em seu artigo 1º que os empreendimentos que se destinam a exploração dos recursos minerais deverão submeter seus projetos a aprovação dos órgãos federais, estaduais e municipais competentes. E que para elaboração de tais projetos, deverão também executar o Estudo de Impacto Ambiental (EIA), o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), bem como o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). Além disso, definiu ainda que os empreendimentos já existentes deveriam regularizar sua situação por meio de um PRAD.

Saber a situação de um empreendimento em relação ao meio ambiente só é possível tendo como parâmetros os valores determinados pela legislação. As especificações legais e reguladoras também devem ser levadas em consideração em casos de intervenções no processo produtivo com medidas corretivas que assegurem a redução dos impactos ambientais, sempre visando alcançar a adequação ambiental (FERRARI e FIGUEIREDO, 2001). Mais especificamente com o objetivo regulador, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) estabelece uma grande quantidade de normas para a produção de cerâmica, sendo essas regras distribuídas entre as etapas do processo de fabricação como a ABNT/NBR 7.171, de novembro de 1992 para Bloco Cerâmico para Alvenaria.

A partir da criação desse aparato legal, empresas que funcionam sem Licença Ambiental ou em desacordo com a legislação ambiental responderão às sanções previstas em lei, estando sujeitas a multas, embargos, paralisação temporária ou definitiva das atividades.

3.5 – Resíduos sólidos

Os resíduos sólidos são provenientes da atividade humana, seja ela de qualquer natureza, e resultam sempre de materiais diversos. Em função da crescente industrialização, do aumento das populações e do seu poder aquisitivo, a geração de grandes volumes desses resíduos sofre significativa aceleração.

Dessa forma, devido à sua relação com a questão ambiental, seja pelo espaço que ocupam, seja por suas composições físico-químicas, os resíduos sólidos vem sendo cada vez mais alvo do interesse de estudiosos, e simultaneamente, ao longo dos anos, também passam por um disciplinamento legal cada vez mais rigoroso.

Assim, a preocupação em defini-los é seguida pela preocupação em disciplinar sua geração, e constantemente revisá-la e atualizá-la. Essas práticas são citadas dentro da concepção do que seja uma gestão ambiental. Sendo a gestão de resíduos definida como uma disciplina associada com o controle de sua geração, sua disposição temporária ou armazenamento, transferência, processamento e disposição final. Essa busca para minimizar os impactos derivados da gestão de resíduos sólidos já é feita há mais de 10 anos (DESKALOPOULOS e PROBERT, 1997).

Dentro dessa perspectiva, a reutilização surge como uma ferramenta indispensável para viabilizar a disposição destes resíduos, transformando-os em matéria-prima. Nesse sentido, a indústria de cerâmicas se apresenta com um grande potencial absorvedor dos resíduos sólidos. Tendo em vista que eles podem ser incorporados à massa cerâmica de forma a não prejudicar as suas propriedades, já que ela é um material de composição química heterogênea.

A utilização desse expediente nos processos cerâmicos implica em pelo menos três vantagens: a reciclagem e inertização dos resíduos frequentemente poluentes e de difícil eliminação, economia de matérias-primas e, conseqüentemente, aumento de vida útil das jazidas e redução dos custos. A incorporação de resíduos pode ainda ser benéfica com efeitos positivos nas propriedades dos produtos cerâmicos semi-acabados e acabados, mesmo sabendo-se que em alguns casos possam ocorrer pioras em determinados aspectos. Esses efeitos influenciam em todas as fases do processo (moldagem, secagem e sinterização) e podem ter repercussão nas propriedades dos produtos acabados, tais como: retração linear, porosidade, absorção de água e resistência mecânica (MARSIGLI, FABRI e DONDI, 1997).

Com o objetivo de desenvolver materiais altamente resistentes às condições ambientais e obter produtos com características comerciais, grande quantidade de estudos tem se detido à análise de comportamento de vitrificação e formulações obtidas pela mistura de vários tipos de resíduos. As suas quantidades incorporadas às matrizes cerâmicas podem variar entre 10% e 60%, provocando ligeiras mudanças nas propriedades mecânicas, retração e absorção de água (SABRAH e EBIED, 1987).

Dentre as inúmeras opções de resíduos reaproveitáveis pela indústria de cerâmicas, merecem atenção especial aqueles gerados pelas olarias, tendo em vista que essas atividades estão presentes em praticamente todos os municípios brasileiros e a sua consequente amplitude de ação poluidora.

No processo produtivo da cerâmica vermelha, um subproduto sólido, a cinza, é gerado através da queima da madeira que é um dos principais combustíveis comumente utilizados nesta atividade industrial (HAANDEL e SOBRINHO, 2006).

A utilização desses resíduos como matéria-prima na indústria cerâmica é uma prática que vem sendo adotada em vários países (Alemanha, Espanha, Japão entre outros) e apresenta uma série de vantagens em relação a outros tipos de uso, pois a operação de queima realizada no processo produtivo da cerâmica, em fornos operando em altas temperaturas, faz com que os riscos sanitários sejam reduzidos ao máximo.

3.6 – Cinza

As cinzas são os resíduos resultantes da combustão de um combustível sólido. E por este ser uma fonte de energia largamente usada, no Brasil, a quantidade de cinzas geradas é muito grande, e na maior parte das vezes não têm o destino adequado, causando assim impactos negativos ao meio ambiente.

Para se ter uma noção da dimensão do problema, estima-se que só no município de Campos dos Goytacazes, no Rio de Janeiro, as mais de 100 cerâmicas lá instaladas produziram, em 2005, mais de 300 toneladas de cinzas por mês (BORLINI, *et al.*, 2005).

É importante ressaltar que as cinzas contêm metais e podem causar poluição do ar e ser responsável por graves problemas respiratórios nas pessoas atingidas (LUCENA, 2007).

Uma solução tecnológica para essa e outras questões relacionadas aos impactos ambientais causado pela liberação indiscriminada desses resíduos, seria a sua incorporação em produtos cerâmicos argilosos.

3.6.1 – Reaproveitamento de cinza

A associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 10004/2004 classifica os resíduos em perigosos (classe I) e não perigoso (classe II), separando ainda os resíduos

não perigosos em não inertes (classe II A) e inertes (classe II B). Dentre todos os resíduos oriundos da produção de cerâmica estrutural, destacam-se aqueles resultantes das quebras do produto final e as cinzas do processo de combustão, sendo ambos classificados como resíduo inerte. Como as quebras são decorrentes das perdas do produto acabado, após a queima, só podem ser reaproveitadas como matéria-prima após sofrer um processo de moagem. Já as cinzas obtidas da combustão de lenha são especialmente ricas em cálcio, sendo compostas por carbonato de cálcio, apresentando aglomerados de partículas esféricas e porosas e com tamanho médio de 0,15 mm (BORLINI, 2005).

Em algumas regiões brasileiras, é muito comum, por parte das indústrias cerâmicas, a utilização da lenha no seu processo produtivo, fato que acarreta numa grande geração de cinzas. Tais cinzas são descartadas em terrenos, aterros não preparados e lixões, provocando a poluição de rios, poluindo os solos e, até mesmo, o ar. Essa contaminação da atmosfera tem grande probabilidade de causar ou agravar problemas respiratórios em quem mantiver contato prolongado com esses poluentes, já que as cinzas também contêm metais. Os seus efeitos dependem, em geral, da sua constituição química e do tamanho das suas partículas, visto que quanto menores são mais facilmente penetram nas vias respiratórias.

Um excelente exemplo de região que apresenta esse panorama é o município de Campos dos Goytacazes, situado no norte do Estado do Rio de Janeiro, onde existe uma área de aproximadamente 900 km² com abundância em argilas aluviais formadas por sedimentos quaternários levados pelo Rio Paraíba. Tendo o setor de cerâmica vermelha mais de 100 indústrias ali alocadas, cujo principal produto é o tijolo, com a estimativa de mais de 60 milhões de peças/mês. Sabendo-se também a quantidade de lenha consumida por milheiro de tijolo e o teor de cinzas, estima-se uma geração mensal de aproximadamente 300 toneladas de cinzas (BORLINI *et al.*, 2005).

Diante dessa situação, uma alternativa tecnológica para reduzir os impactos ambientais causados pela liberação indiscriminada de resíduos, particularmente as cinzas, seria a sua incorporação em produtos cerâmicos argilosos. Durante a fase de queima do processo de produção de cerâmica, a eliminação de metais potencialmente tóxicos pode ser promovida por volatilização, mudanças químicas e estabilização na fase vítrea, formada pela participação de aluminossilicatos e fundentes. Além disso, o setor de cerâmica vermelha não requer controle rigoroso das matérias-primas, sendo mundialmente utilizado para incorporar resíduos industriais.

A queima da madeira gera uma grande quantidade de cinzas, podendo conter sílica, potássio e fósforo. A sílica, na forma de quartzo, pode contribuir para ajustar a plasticidade/trabalhabilidade da massa cerâmica, facilitando a secagem e ainda regulando as reações de queima. O potássio e o fósforo podem atuar como fundentes na etapa de queima contribuindo para melhorar as propriedades físicas e mecânicas da cerâmica através da redução da porosidade pela formação de fase líquida (BORLINI, 2005).

Estudos realizados em todo o mundo indicam diferentes métodos e graus de porcentagem de cinza que pode ser adicionado à massa cerâmica, variando nas proporções entre 5% a 20% (LUCENA, 2007; PARALHOS, 2010 e PEREIRA, 2010). (2004).

Borlini (2006) estudou a influência da temperatura nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais da cerâmica vermelha com incorporação da cinza de bagaço de cana de açúcar. Os resultados obtidos indicaram que a incorporação de até 10% de cinza na massa cerâmica não mudou a resistência mecânica após sinterização a 1200°C, quando comparada à massa cerâmica sem o resíduo queimada na mesma temperatura.

Borlini (2005) analisou a cinza da lenha de eucalipto para aplicação em cerâmica vermelha, mostrando que a cinza pode agir como fundente potencial e pode contribuir para melhorar as propriedades de queima através da redução da porosidade pela formação da fase líquida em reação com alguns óxidos.

Paranhos (2010) estudando o aproveitamento de cinza da cana de açúcar em massas cerâmicas. Evidenciou que a utilização dessa cinza como fundente em substituição ao feldspato na formulação de massa cerâmica, é viável. Constatou, ainda, que tal aplicação pode minimizar impactos ambientais e reduzir custos de produção, sendo possível desenvolver formulações cerâmicas com adição de 20% de cinza do bagaço de cana de açúcar para a produção de blocos com valores de retração linear, absorção de água e resistência a flexão dentro dos valores especificados pelas normas ABNT/NBR 6220 e 13818 de 1997.

Pereira (2010) avaliou a possibilidade da adição da cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto em cerâmica estrutural. Notou que através da análise química, que esse tipo de cinza apresentou elevado teor de óxido de cálcio (CaO) (40,10%), que geralmente tem efeitos fundentes acima de 1100 °C. Foi observado nos produtos cerâmicos aumento da quantidade de poros, devido a não formação da fase líquida

durante a sinterização, acarretando menor resistência mecânica à flexão, maior absorção de água e menor retração linear de queima comparada aos mesmos valores dos mesmos parâmetros, conseguidos a partir de corpos cerâmicos obtidos com massa sem inclusão de cinza.

Embora alguns experimentos tenham revelado resultados insatisfatórios, acredita-se que o recurso de obter cerâmica a partir de adições de resíduos sólidos, tais como as cinzas, é uma excelente alternativa na preservação da natureza. Prova disso é que atualmente constata-se um acentuado crescimento de pesquisas acerca do tema, que se deve, em grande parte, à busca de formas estáveis para disposição final das cinzas, visando assim evitar seus efeitos poluentes ao meio ambiente. Tanto que em alguns casos, o objetivo maior não é a obtenção de produtos de valor agregado mais elevado, mas simplesmente estabilizar os poluentes e estender o período de vida útil da jazida de argila.

3.7 – Caracterização das argilas

A caracterização das argilas enfoca a natureza, quantidade de minérios ou compostos químicos presentes, e outros parâmetros próprios da matéria-prima, como a granulometria, comportamento térmico e o comportamento na presença de água.

Segundo Sousa Santos (1975) caracterizar uma argila é conhecer a variabilidade de suas propriedades, utilizando técnicas comuns (usadas para medir propriedades tecnológicas como física e mecânica) ou mais sofisticadas (como a difração de raios-X).

Dentre as diversas técnicas que podem ser utilizadas para essa caracterização, as mais comuns são: análise química, análise térmica, análise mineralógica através de difração de raios-X, além de propriedades tecnológicas que refletem os resultados do tratamento térmico como a retração linear, porosidade aparente, densidade aparente, absorção de água e resistência mecânica.

3.7.1 – Análise química

As argilas, matérias-primas das cerâmicas, são compostas normalmente por diferentes espécies mineralógicas que se misturaram durante o processo de formação. Por este motivo, suas propriedades dependem da natureza dos minerais presentes, do seu estado de degradação e de suas proporções (BARBA *et al*, 1997).

A análise química define-se como uma técnica que consiste em determinar a composição de uma matéria-prima, fornecendo os percentuais de óxidos presentes e também os valores de perda ao fogo (EMILIANI e CORBARA, 1999). Sendo esta última a diminuição de peso, até um valor constante, que indica uma perda de material devido ao aumento de temperatura. Demonstrando, com isso, o teor de matéria orgânica presente na argila e a quantidade de gás e vapor que são formados durante o aquecimento, resultantes da decomposição dos carbonatos.

Essa análise pode ser realizada através de métodos químicos ou físicos. Sendo os químicos, geralmente, empregados através de reações de precipitação seletiva e reações de formação de complexos corantes. Já os métodos físicos podem ser através de espectrofotometria ou ainda por fluorescência de raios-X.

3.7.2 – Análise mineralógica

Para Reed (1995), as propriedades dos materiais cerâmicos são determinadas pelas características atômicas e microestruturais dos materiais que os compõe. A partir da seleção das matérias-primas, processo de fabricação e produto, pode-se fazer o controle dessas características. O que é fundamental para que os defeitos microestruturais sejam minimizados (ARRUDA e MARIBONDO, 2007).

A técnica mais usada para realizar a análise mineralógica de argilas é a difração de raios-X, a qual possibilita a identificação dos minerais presentes, e também permite estudar as características cristalográficas destes minerais.

As análises de difração de raios-X e fluorescência de raios-X fornecem como resultados as fases presentes na argila e a relação dos elementos constituintes da argila com a sua proporção na forma de óxidos, respectivamente. Através da combinação da análise química, qualitativa e quantitativa, onde os elementos são todos considerados existindo na forma de óxidos, têm-se informações suficientes para determinar a composição mineralógica das fases presentes na argila. Essa técnica tem como fundamento básico a resolução simultânea de equações lineares montadas para cada fase detectada por difração de raios-X (VARELA *et al.*, 2005).

3.7.3 – Limite de liquidez (LL)

Limite de Liquidez (LL) é definido como o teor de umidade abaixo da qual o solo se comporta como plástico, ou seja, é a umidade de transição entre os estados líquidos e plásticos desse material e para o qual ele apresenta uma pequena resistência ao cisalhamento. Experimentalmente, ele corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande.

É possível identificar o Limite de Liquidez através de dois dispositivos: a concha de Casagrande e o penetrômetro de cone. Sendo LL determinado de acordo com a norma ABNT/NBR 6459: 1984. (PARANHOS, 2010).

3.7.4 – Limite de plasticidade (LP)

O Limite de Plasticidade (LP) é definido como o teor de umidade abaixo do qual o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido (umidade de transição), ou seja, ele perde a capacidade de ser moldado e passa a ficar quebradiço. Assim, como no Limite de Liquidez (LL), é importante observar que a mudança de estado nos solos ocorre de forma gradual, em função da variação da umidade, portanto a determinação do limite de plasticidade também precisa ser arbitrado, o que não diminui seu valor, uma vez que os resultados são índices comparativos. Desta forma, torna-se indispensável à padronização do ensaio que determina o LP, sendo ele realizado pelo método dado pela norma ABNT/NBR 7180: 1984

Esse ensaio consiste, basicamente, em se determinar a umidade do solo quando uma amostra começa a fraturar ao ser moldada com a mão, sobre uma placa de vidro, na forma de um cilindro com cerca de 10 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro.

3.7.5 – Índice de plasticidade (IP)

O Índice de Plasticidade (IP) representa a quantidade de água necessária a acrescentar ao solo para que este passe do estado plástico ao estado líquido, podendo ser definido como a diferença entre os limites de liquidez e o de plasticidade.

No caso da argila, a propriedade expressa pelo Índice de Plasticidade é um fator determinante para a qualidade da cerâmica em função do processamento adotado (PARANHOS, 2010).

Neste sentido, Bruguera (1986) classifica os solos argilosos a partir de seus índices de plasticidade da seguinte forma:

$1 < IP < 7$ – Fracamente Plástico;

$7 < IP < 15$ – Medianamente Plástico;

$IP > 15$ – Altamente Plástico.

3.7.6 – Análise termogravimétrica (TG)

A análise Termogravimétrica é a técnica utilizada para medir a mudança da massa de uma substância em função da temperatura, sendo esta submetida a uma programação controlada (PARANHOS, 2010).

Esse controle é realizado a partir de uma velocidade de aquecimento constante e uma balança para fazer o registro das variações na massa.

Dentre as inúmeras aplicações existentes da termogravimetria destacam-se:

Calcinação e torrefação de minerais;

Decomposição térmica ou pirólise de materiais orgânicos, inorgânicos e biológicos;

Determinação da umidade, volatilidade, e composição de cinzas;

Estudo da desidratação e da higroscopicidade;

Reações no estado sólido que liberam produtos voláteis;

Taxas de evaporação e sublimação.

3.7.7 – Análise térmica diferencial (ATD)

A Análise Térmica Diferencial é uma técnica que consiste na medida da diferença de temperatura entre uma substância e um material de referência, sendo tal quantificação realizada em função da temperatura e ao longo do momento em que a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura (PARANHOS, 2010).

Um exemplo prático do uso da análise térmica diferencial é o ensaio feito em amostras de minerais. A qual é realizada aquecendo-se, simultaneamente, a uma velocidade constante de aquecimento, o mineral a ser analisado e um material neutro, tal como alumina calcinada, registrando-se as diferenças de temperatura entre os dois materiais. Um condutor termoeletrico une as amostras permitindo uma avaliação das mudanças de temperatura apresentada entre eles. O material neutro serve como padrão

enquanto que o outro é o material a ser analisado. Entre esses pares é colocado um galvanômetro de escala graduada, em série com uma resistência crítica. O sistema montado permite detectar qualquer diferença de temperatura do mineral em relação ao padrão. Geralmente usa-se uma temperatura de aquecimento no forno de 12°C/min (GOMES, 1986).

3.8 – Propriedades tecnológicas

A qualidade do produto cerâmico está diretamente ligada as suas propriedades tecnológicas, entre elas destacam-se: Retração Linear (RL), Massa Específica Aparente (MEA), Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA), e Tensão de Ruptura à Flexão (TRF). Uma breve descrição destas propriedades é dada abaixo.

3.8.1 – Retração linear (RL)

A retração linear consiste basicamente na variação das dimensões lineares dos corpos após a queima. Ela é dada em porcentagem, sendo seu valor positivo quando houver retração e negativo quando houver expansão. A RL é consequência da eliminação da água existente na matéria-prima e adicionando na formulação da massa, pois, com a perda de água, surgem vazios deixado por ela, e estes tendem a ser reduzidos com a aproximação das partículas devido às forças de atração eletrostática, provocando o que se chama de aglomeração ou densificação. Por ocasião da queima, a retração é decorrente do fenômeno de sinterização (PARANHOS, 2010).

3.8.2 – Massa específica aparente (MEA)

A Massa Específica Aparente (MEA) é a razão entre o peso dos corpos de prova seco P_s (em gramas) e o volume aparente dos corpos de prova V_a (em cm^3) (PARANHOS, 2010).

Utilizando-se como exemplo o solo, sabendo-se que ele é um sistema composto de três fases: gasosa (ar), líquida (água) e sólida, nesse sentido, a Massa Específica Aparente se refere ao sistema completo. Já quando esse material é seco, ou seja, tem sua água removida, obtém-se a Massa Específica Aparente Seca. E quando é retirado do sistema o ar e a água tem-se a Massa Específica Real, a qual corresponde à massa específica dos grãos de sólidos.

A Massa Específica Aparente Seca do solo, por exemplo, é determinada pelo seu correspondente volume deslocado de água o qual, é alcançado com um ensaio que consiste na verificação da variação do peso e volume de um recipiente contendo água, quando nele introduz-se certa quantidade de solo seco.

3.8.3 – Absorção de água (AA)

A Absorção de Água (AA) nada mais é que a capacidade que o material possui de aumentar a sua massa absorvendo a água que o envolve (PARANHOS, 2010).

Para CHIH-HUANG et al., (2003), a absorção de água é um fator chave no efeito da durabilidade do produto cerâmico estrutural. A menor infiltração de água, determina a maior durabilidade e resistência ao ambiente natural ao qual o material é exposto. Assim, a estrutura do material cerâmico precisa ter uma superfície capaz de evitar a entrada de água.

Por ter influência direta sobre outras propriedades do produto, a Absorção de Água é um dos parâmetros de classificação das cerâmicas. A resistência mecânica destas, por exemplo, é inversamente proporcional à sua capacidade de absorção, ou seja, quanto maior sua Absorção de Água menor será sua resistência.

3.8.4 – Porosidade aparente (PA)

A Porosidade Aparente (Pa) determina a quantidade de poros abertos presentes no material, a qual é definida pelo quociente da diferença entre o peso do corpo-de-prova saturado em água e o peso do corpo-de-prova queimado (volume de poros abertos), pelo volume aparente dele, sendo a Pa calculada em percentagem.

Dentro desta perspectiva, a porosidade aparente de um corpo cerâmico cozido é um índice das reações que se processam durante a cozedura, do grau de impurezas e da granulometria dos seus constituintes, estabelecendo, assim, a gama térmica de cozedura de um produto e do respectivo grau de sinterização (GOMES, 1986).

Considerando-se vitrificada a amostra que não absorve mais de 1% de seu peso em água, o ensaio para determinar a porosidade aparente permite apreciar o grau de vitrificação da argila. Esse método utiliza o corpo-de-prova prensado e queimado em mufla com variação de temperatura de acordo com a necessidade do cliente. Os

resultados são apresentados em tabela demonstrativa com temperatura de queima e valor da porosidade em porcentagem (PARANHOS, 2010).

3.8.5 – Tensão de ruptura a flexão (TRF)

A Resistência à Flexão determina o valor da carga que, aplicada ao corpo-de-prova, causa uma ruptura neste, após um aumento uniforme daquela (PARANHOS, 2010). Normalmente, capacidade do corpo em suportar esforços exercidos por cargas, é obtida por meio de ensaio de flexão por três pontos e é calculada através de equações que envolvem a força máxima aplicada e as dimensões da peça.

Essa resistência está diretamente relacionada à Absorção de Água do material, sendo aquela maior, à medida que esta for menor. Esta informação é muito importante, principalmente no caso de placas para revestimento, pois o grau de resistência do produto a ser usado dependerá diretamente das características do local de assentamento.

3.9 – Análise microestrutural

A análise microestrutural é uma das técnicas mais simples e eficazes para a caracterização de materiais, seja através da microscopia óptica ou da microscopia eletrônica de varredura. Em determinados casos, quando se faz necessário, utiliza-se também de outras técnicas, tais como análises químicas, difração de raios-X e micro análises, as quais também têm a finalidade de oferecer mais informações acerca da microestrutura do material alvo.

A microestrutura é um dos aspectos mais importantes dos materiais de interesse da engenharia, sendo ela uma consequência da composição química, da história térmica e do processamento, três pontos que influenciam decisivamente nas propriedades dos materiais e, conseqüentemente, no seu desempenho. Dessa forma, ao se fazer a análise microestrutural de um material, coleta-se informações essenciais, que associadas à composição e ao método de conformação mecânica, permitem prever suas características e o seu comportamento durante a aplicação (MARTINS et al, 2008).

As informações obtidas através das análises microestruturais sobre o tamanho do grão, inclusões, impurezas, fases secundárias, porosidades, segregação e defeitos superficiais, dão uma boa idéia de como o material era originalmente e das transformações sofridas por processamentos subsequentes. Todo esse conhecimento

permite identificar como o material foi produzido, bem como a sua qualidade resultante (MARTINS et al, 2008).

As técnicas de exames micro e macroestruturais são empregadas em áreas tais como: controle de qualidade de rotina, análises de falhas, pesquisas e desenvolvimento de materiais. No âmbito do controle de qualidade, a análise microestrutural é usada para determinar se os parâmetros estruturais estão de acordo com certas especificações padronizadas por normas. Isso é possível devido ao fato de que as características obtidas a partir dessas análises podem ser quantificadas ou medidas e comparadas a um critério de aceitação preestabelecido (MARTINS et al, 2008).

No âmbito da ciência, onde existe a constante busca pela solução de problemas diversos, as análises microestruturais são utilizadas em pesquisas para constatar se as microestruturas projetadas foram alcançadas como o previsto e se alterações no processamento, ou no tratamento térmico, provocam mudanças na estrutura interna.

3.10 – Qualidades nos produtos cerâmicos

Ao longo do processo produtivo das cerâmicas, nas diversas etapas de fabricação, é comum que algumas peças apresentem defeitos dos mais variados tipos e proporções. Essas falhas são detectadas por meio de testes visuais, físicos e mecânicos, os quais têm o objetivo de avaliar a qualidade e classificar os produtos cerâmicos dentro das normas para cada uso específico (CAMPREGHER, 2005).

Assim sendo, considerável parte dos produtores de cerâmica utiliza o termo “qualidade” como um indicador quantitativo da porcentagem da produção classificada como produto de primeira, ou seja, a porcentagem da produção isenta de defeitos, segundo seus critérios internos.

Porém, para Professor Emérito da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais e autor, do livro “TQC – Controle da Qualidade Total (no Estilo Japonês)”, Vicente Falconi Campos, o termo “qualidade” tem significado diferente daquele citado acima, sendo por ele definido da seguinte forma:

“O verdadeiro critério da boa qualidade é a preferência do consumidor. É isso que garantirá a sobrevivência de sua empresa: a preferência do consumidor pelo seu produto em relação ao seu concorrente, hoje e no futuro.”

Nesse sentido, é importante ressaltar que a expressão qualidade na forma como é usualmente entendido e usado nas indústrias brasileiras de cerâmicas, não possui o mesmo significado que nos outros setores da economia.

3.11 – Defeitos nos produtos cerâmicos

Um estudo feito pela FIESP (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo) identificou os maiores problemas relacionados com materiais de construção para as empresas construtoras de edificações, na percepção de suas equipes técnicas. Embora seja a opinião de compradores e usuários organizacionais, ele serve como balizamento para o mercado e, conseqüentemente, para o consumidor final.

Para a realização da pesquisa que embasou esse estudo, foram considerados 31 materiais e componentes da construção civil, partindo da definição de cesta básica de materiais, proposta pelo PBQP-H (Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade de Habitat) do Ministério das Cidades.

No âmbito dos blocos cerâmicos, foi identificado que os problemas que geram maior insatisfação nos compradores corporativos estão ligados à baixa qualidade do produto e à falta de padronização e normalização (FIESP, 2004).

Esse dado reflete a importância da busca para minimizar os defeitos nos corpos cerâmicos. Observando que suas características são decorrentes de sua composição química e do processo de fabricação da cerâmica que lhe deu origem, como temperatura de queima, quantidade de determinados componentes e também o tamanho médio dos grãos utilizados. Defeitos como trincas, fraturas, empenos, desuniformidade de queima, escamação, inchamento dos bordos, superfícies irregulares, deformações e porosidade não desejada são decisivos para a qualidade final do produto. (SCHULLER e AGUIAR, 2008).

Essas falhas são adquiridas no decorrer do processo produtivo cerâmico em suas diversas etapas de fabricação. Segundo a percepção de Fernandes (2002), mesmo adotando cuidados especiais ao longo das etapas produtivas, é muito difícil extinguir todos esses problemas e para garantir certo padrão de qualidade, algumas empresas fazem a classificação das peças, a partir de aspectos ou critérios pré-estabelecidos, como por exemplo:

- defeitos superficiais;
- definição de tonalidade;

- defeitos de ortogonalidade;
- defeitos de planaridade;
- aspectos dimensionais.

A maior parte desses defeitos é gerada após a operação de queima, e quando a falha é grave, a ponto do produto não poder ser comercializado, ele torna-se um rejeito. Este rejeito é chamado de chamote da indústria cerâmica. Sendo ele oriundo de algum produto cerâmico defeituoso que não pode ser utilizado nas mesmas condições que seria caso se apresentasse íntegro, sem a presença dos tantos defeitos já citados (CASTRO, 2008).

No Brasil, a perda com produtos defeituosos situa-se entre 2% e 10%, podendo até ultrapassar esse limite, tendo em vista que essa quantidade depende de vários fatores. Esse chamote pode ser incorporado novamente na massa cerâmica, apresentando, inclusive, vantagens na melhoria dos parâmetros pré-queima. Porém, para o seu aproveitamento, é necessário que a queima seja realizada em temperaturas superiores a qual foi obtido (GOUVEIA e SPOSTO, 2009). Esse processo de incorporação do rejeito de produto defeituoso é uma solução para minimizar as perdas econômicas e ambientais por ele causadas.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Materiais

4.1.1 – Massa cerâmica industrial

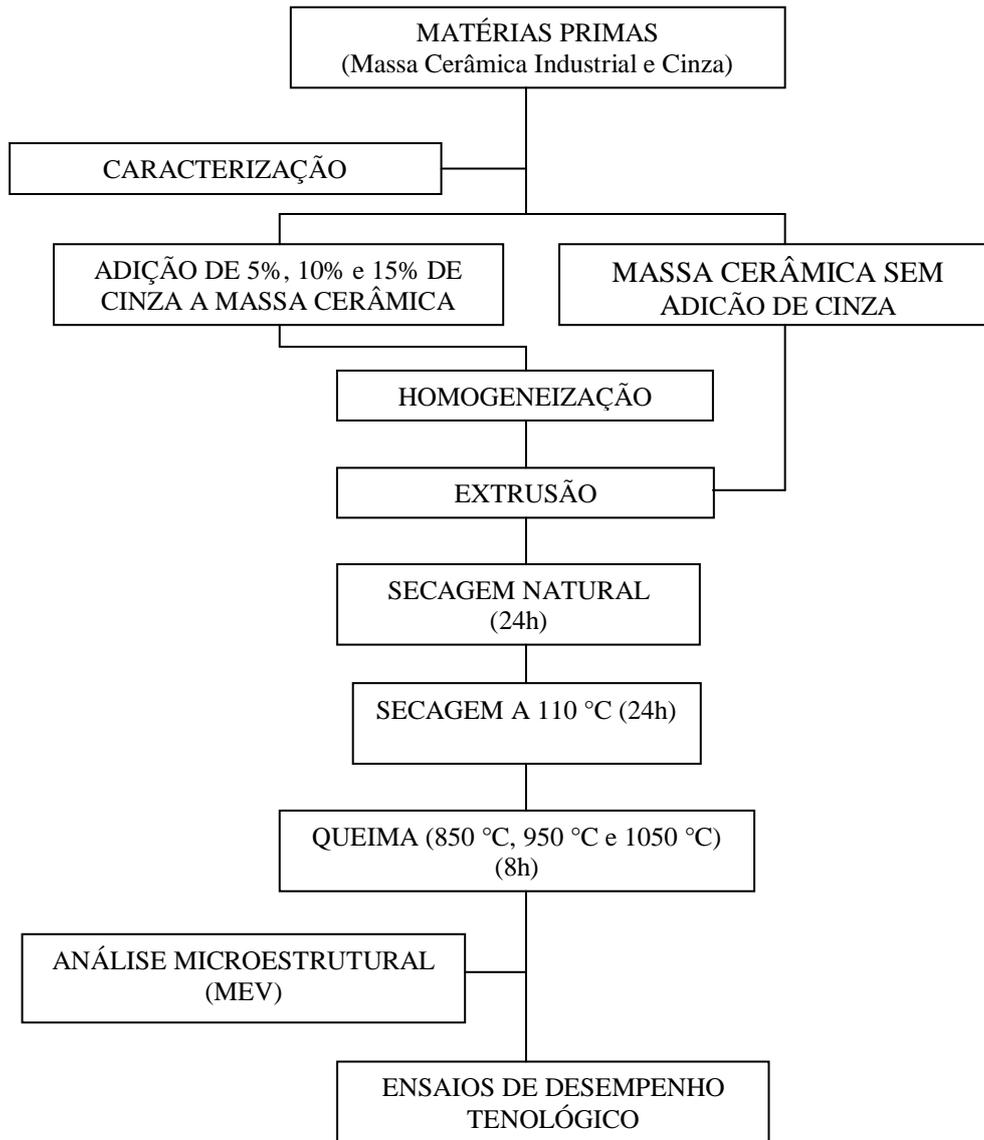
Neste trabalho foi utilizada a massa cerâmica industrial de uma cerâmica de médio porte, com capacidade de produção de aproximadamente 8.000 peças por mês, localizada no município de Caruaru – PE. Essa massa cerâmica é formada por uma mistura de argilas que diferem em graus de plasticidade (na proporção volumétrica barro massapé / barro vermelho de 4:1), e por isso são combinadas na fábrica para permitir melhor conformação das peças cerâmicas. Essa massa foi coletada depois da homogeneização num ponto entre o laminador e a extrusora. Foi coletada 60 kg da massa cerâmica, que foi seca em estufa a 65 °C, por 48 h, e moída em moinho de discos, para obtenção de partículas passantes na peneira nº 80 mesh (150 µm), considerando a necessidade de adequação às condições de laboratório para a produção de corpos de prova. Todas as caracterizações físico-químicas foram realizadas após este beneficiamento.

4.1.2 – Cinza de lenha

A cinza utilizada neste trabalho foi proveniente da queima de lenha de aveloz foi coletada no forno da mesma cerâmica onde foi coletada a massa cerâmica. Foram coletados 5 kg de cinza, que foram moídos no moinho de discos para obtenção de partículas passantes na peneira de Nº 80 mesh (150 µm), objetivando adequação às condições granulométricas estabelecidos neste trabalho para a massa cerâmica industrial. Todas as caracterizações físico-químicas foram realizadas após este beneficiamento.

4.2 – Métodos

A metodologia que foi empregada nesse trabalho envolveu a coleta, preparação e a caracterização das matérias-primas, formulação da massa cerâmica com cinza, produção de corpos de prova a partir da massa industrial com e sem cinza para ensaios de desempenho tecnológicos e análise microestrutural da cerâmica produzida, conforme fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.

Fonte: Figura do autor, 2012.

4.2.1 – Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas utilizadas no presente trabalho foram caracterizadas mediante aplicação de análises de fluorescência de raios-X, granulométrica, difração de Raios-X, TGA e limites de consistência.

4.2.1.1 - Análise química

A composição química de todas as matérias-primas foi determinada por fluorescência de raios X, em espectrofotômetro de fluorescência de raios-X (EDX-720, *Shimadzu*) a vácuo, no Laboratório de Química da UFCG.

4.2.1.2 – Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada no laboratório de solos da UFPE (Campus Recife). Foram realizados ensaios com e sem defloculante. O uso do defloculante visou obter melhor dispersão das partículas, e assim, resultados reais sobre o tamanho das mesmas. Embora existam vários dispersantes disponíveis no mercado, o que foi utilizado foi o hexametáfosfato de sódio, em soluções de 0,5%. Para este ensaio foi utilizada a norma ABNT/NBR 7181: 1984. Também foi estabelecida a composição granulométrica das massas cerâmicas e seus respectivos campos de aplicação baseado no diagrama de Winkler (1954).

4.2.1.3 – Análise mineralógica (DRX)

As análises mineralógicas da massa cerâmica industrial e da cinza foram feitas no Departamento de Física da UFPE (campus Recife), com as amostras passadas em peneira ABNT nº 200, diâmetro de abertura de 0,074 mm, utilizando difratômetro de raio X Shimadzu, com radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), tensão de 40 kV, corrente de 20 mA, ângulo de varredura (2θ) de 3° a 70°, passo de 0,02 ° (2θ).

4.2.1.4 – Análise termogravimétrica

Essa análise foi realizada no laboratório de Química Fundamental da UFPE (campus Recife) utilizando um equipamento TGA-50 H (Shimadzu), em cadinho de platina sob metidas a fluxo de nitrogênio (vazão de 10 mL/min), taxa de aquecimento de 10°C/min, num intervalo de temperatura de 25°C a 900°C.

4.2.1.5 – Limites de consistência

Os limites de Atterberg foram determinados na massa cerâmica industrial e nas amostras obtidas mediante composições cerâmicas com incorporação de cinzas (5%,

10% e 15%), no laboratório de solos da UFPE (campus Recife). Foram seguidas as recomendações das normas ABNT/NBR 6459: 1984 e ABNT/NBR 7180: 1984. As proporções foram escolhidas baseadas em concentrações mínimas e máximas comumente utilizadas em outros estudos de massas cerâmicas com cinzas (BORLINI, 2005; LUCENA, 2007; PARALHOS, 2010; PEREIRA, 2010 e CAMPOS, 2011).

As amostras submetidas a esse ensaio foram secas em estufa por 24h, a 65°C, destorroadas para haver boa homogeneização e, em seguida, peneiradas em peneira ABNT/NBR N° 71801/84 (0,42 mm). Foi utilizada a fração de 200g que passou na mencionada malha para ser utilizadas nos demais ensaios.

Limite de liquidez (LL)

Para esse ensaio foi necessário colocar a amostra na cápsula de porcelana, adicionando água destilada em pequenas proporções. Após isso, transferiu-se parte da amostra para a concha moldando até obter uma espessura de 1 cm. Essa espessura foi medida através de um gabarito (contido no cinzel). Com auxílio do cinzel fez-se uma ranhura na parte simétrica da amostra. Logo após foi colocada a concha sobre a plataforma de apoio. Com isso fez-se uma sequência uniforme de 2 giros por segundo no apoio do aparelho. O processo manteve-se constante até que as duas partes do solo assim em contato. A quantidade de giros foi contada e anotada. Na sequência, retirou-se parte da amostra que se contactou que foi pesada e logo após levada à estufa. O processo se repetiu por cinco vezes. A partir dos dados obtidos calculou-se o Limite de liquidez de acordo com a ABNT/NBR 6459: 1984, usando a Equação 1.

$$W(\%) = M_w / M_{ss} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

W(%) = Teor de Umidade

M_w = Massa úmida

M_{ss} = Massa solo seco

Limite de plasticidade (LP)

Para a análise de plasticidade, foi necessário retirar uma porção da amostra fazendo uma modelagem do mesmo semelhante a uma bola pequena. Essa amostra foi

colocada num recipiente de vidro-fosco e com a palma da mão aplicou-se uma pressão para que a amostra tomasse a forma achatada. Com auxílio da espátula, retirou-se a primeira parte e foi devolvida à amostra inicial. Logo após retirou-se outra parte suficiente para, através de movimento com a palma das mãos ate atingir uma forma cilíndrica de 3 mm diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento. O ensaio foi interrompido quando a amostra dividiu-se em três partes. Logo após colocou-se rapidamente a amostra numa cápsula, pesou-se e a mesma foi colocada em estufa na temperatura de 65°C, durante 24 horas. Essa análise foi realizado obedecendo recomendações da ABNT/NBR 7180:1984.

Índice de plasticidade (IP)

Determinou-se o índice de plasticidade pela diferença entre o limite de liquidez e limite de plasticidade (equação 2), de acordo com a norma ABNT/NBR 7180: 1984.

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Onde:

IP – Índice de Plasticidade (%)

LL – Limite de Liquidez (%)

LP – Limite de Plasticidade (%)

4.2.2 – Elaboração das composições cerâmicas

As massas cerâmicas foram conformadas sem adição de cinza e com substituição de parcelas de massas da argila por cinza, obedecendo aos percentuais 5%, 10% e 15%. Tais percentuais foram escolhidos com base em resultados da literatura com diversos tipos de cinzas que mostraram que estas substituições podem produzir produtos cerâmicos de interesse industrial (BORLINI, 2006). As massas cerâmicas, assim obtidas, apresentaram trabalhabilidade adequada para a conformação de produtos cerâmicos (no caso em estudo, os corpos de prova), conforme será mostrado nos resultados dos ensaios de consistência. A Tabela 1 apresenta as composições das formulações estudadas.

Tabela 1 - Composição das massas cerâmicas com cinzas.

| TEROR DE CINZA (%) | % EM PESO DA MATERIA PRIMA | | NUMERO DE CORPOS DE PROVA |
|-----------------------|------------------------------|-------|------------------------------|
| | MASSA CERÂMICA INDUSTRIAL | CINZA | |
| 0* | 100 | 0 | 40 |
| 5 | 95 | 5 | 40 |
| 10 | 90 | 10 | 40 |
| 15 | 85 | 15 | 40 |
| TOTAL | | | 160 |

(*) **Moldado com massa cerâmica industrial (referência).**

Fonte: Tabela do autor, 2011.

A quantidade de água adicionada à massa cerâmica foi determinada experimentalmente através de ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade para tornar a massa cerâmica plástica para ser moldada por extrusão. Após adição de água, as misturas foram mantidas em repouso por um período de 48 h, com a finalidade garantir tempo suficiente para interação adequada água/massa e, assim, melhorar a plasticidade da massa cerâmica final. Logo após esta etapa, a mistura foi extrudada a vácuo objetivando a confecção de corpos de prova nas dimensões de 2 cm X 1 cm X 20 cm (20 cm representa o comprimento real do bloco de tijolo, 2 cm representa a espessura proporcional portante do peso real da construção e 1 cm é a espessura real da parede do bloco). A maromba utilizada foi MVIG – 05.

Depois da extrusão, os corpos de prova foram secos ao ar em bancada para a retirada do excesso de água por um período de 24h. Este procedimento de secagem dos corpos de prova, antes de sua entrada no forno, deve ser lento e uniforme, para que a água seja eliminada, gradativamente, até que uma pequena percentagem permaneça para manter a coesão da argila e para que a peça não se desagregue antes da queima. Em seguida, os corpos de prova foram transferidos para uma estufa e mantidos a temperatura constante de 110 °C, por um período de 24 h.

Após a secagem em estufa, os corpos de prova foram calcinados em forno elétrico nas temperaturas de 850 °C, 950 °C e 1050 °C por um período de 8h com taxa de aquecimento de 10 °C/min, e patamares de queima de 150 °C por 45 minutos.

4.2.3 – Ensaios de desempenho tecnológico

Os ensaios e os critérios atualmente considerados para definição de uso industrial, no âmbito de cerâmica vermelha, foram estabelecidos pelo grupo de estudos cerâmicos, capitaneado pelo professor Pércio de Sousa Santos (Sousa Santos, 1989). Os ensaios com esta finalidade correspondem: retração linear, absorção de água e de determinação do módulo de ruptura à flexão.

Sendo assim, os corpos de prova produzidos foram avaliados, quando ao uso cerâmico, após sinterização, com vistas nos resultados de ensaios de retração linear, absorção de água e tensão de ruptura à flexão. Tais ensaios permitem estabelecer se uma formulação cerâmica obedece aos critérios advindos pela indústria cerâmica para confecção de blocos e telhas destinados à construção civil.

Os resultados dos ensaios de porosidade aparente e de massa específica aparente não são parâmetros que apóiam, isoladamente, a definição de uso cerâmico de corpos de prova sinterizados. Apesar disso as informações advindas a partir desses ensaios são de fundamental importância para uma análise interpretativa tomando como base as informações configuradas através dos ensaios de desempenho tecnológico propriamente dito. Com esta finalidade foram realizados, no presente trabalho, os ensaios de massa específica aparente e porosidade aparente.

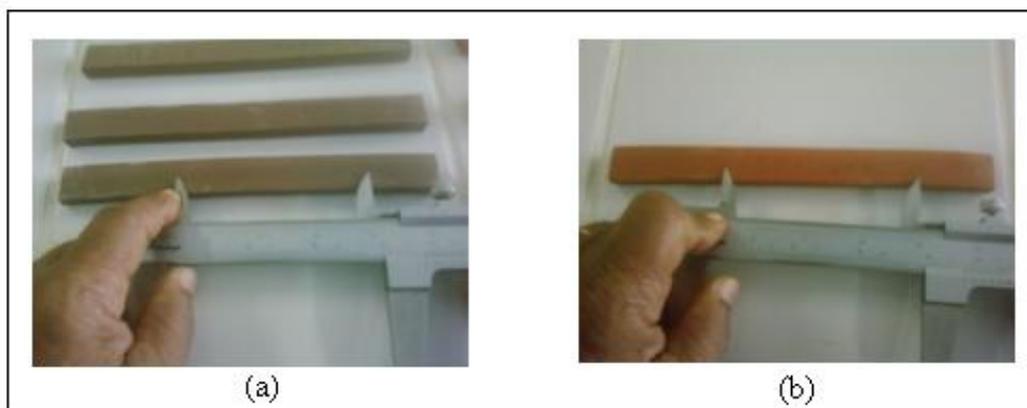
Os ensaios foram executados no Laboratório de Materiais do Instituto Tecnológico de Pernambuco (ITEP), sediado em Recife/PE.

4.2.3.1 – Retração linear

Após a secagem dos corpos de prova a 110 °C, por um período de 24 horas, foram medidas as variações nos seus comprimentos, antes e após a queima a 850 °C, 950 °C e 1050 °C, como mostrado na Figura 2, utilizando um paquímetro com precisão de 0,02 mm.

Segundo Sousa Santos (1989), o valor máximo de retração de um corpo cerâmico não pode representar mais que 10% do seu comprimento inicial.

Figura 2 - Ensaio de determinação da retração linear de corpos de prova cerâmico. (a) medição do corpo-de-prova antes da queima; (b) medição do corpo-de-prova depois da queima.



Fonte: Fotos do autor, 2011.

A retração linear foi calculada utilizando a equação 3.

$$RL (\%) = (C_i - C_f) / C_i \times 100 \quad (3)$$

Onde:

RL = retração linear

C_i = comprimento inicial do corpo de prova

C_f = comprimento final do corpo de prova

Os resultados foram obtidos pela média aritmética de quatro valores em corpos de prova distintos.

4.2.3.2 – Absorção de água

Os testes de absorção de água foram feitos de acordo com as normas NBR 13818/1997 do anexo B da ABNT. Os corpos de prova foram pesados e imersos, por 2 horas, em água destilada em ebulição (Figura 3). Em seguida, os corpos de prova foram retirados da imersão com auxílio de uma pinça, sendo o excesso de água removido com um pano. Os mesmos foram pesados antes e após o contato com a água, a fim de permitir o cálculo do valor da água que cada corpo-de-prova absorveu.

Figura 3 - Corpo-de-prova submerso em água fervida e destilada.



Fonte: Fotos do autor, 2011.

A quantidade de água absorvida pelo corpo (AA) é dada em percentagem. Para tanto, considera-se P_u o peso do corpo úmido (em g) e P_s o peso do corpo seco (em g), conforme a Equação 4.

$$AA (\%) = (P_u - P_s) / P_s \times 100 \quad (4)$$

Onde:

AA = absorção de água

P_u = peso do corpo de prova úmido

P_s = peso do corpo de prova seco

Os resultados foram obtidos pela média aritmética de quatro valores em corpos de prova distintos.

4.2.3.3 – Porosidade aparente

Após a realização das pesagens dos corpos de prova queimados objetivando a determinação da absorção de água, também foi medida a massa dos corpos de prova imersos, pelo método da balança hidrostática (método de Arquimedes).

A porosidade aparente é a relação, em percentagem, entre o volume de poros abertos do corpo-de-prova e ao seu volume total. Os resultados foram obtidos pela média aritmética de quatro valores em corpos de prova distintos. Esse ensaio foi realizado de acordo com a ABNT/NBR 6220: 2011.

A porosidade aparente é calculada pela Equação (5):

$$PA(\%) = \{(Pu - Ps) / (Pu - Pi)\} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

PA = porosidade aparente (%)

Pu = peso do corpo de prova úmido (g)

Ps = peso do corpo de prova seco (g)

Pi = peso do corpo de prova imerso em água (g)

4.2.3.4 - Massa específica aparente (MEA)

Este ensaio foi executado de acordo com a ABNT/NBR 6220: 2011, utilizando-se a Equação 6:

$$MEA = \{Ps / (Pu - Pi)\} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

MEA = massa específica aparente

Ps = peso do corpo de prova seco

Pu = peso do corpo de prova úmido

Pi = peso do corpo de prova imerso em água

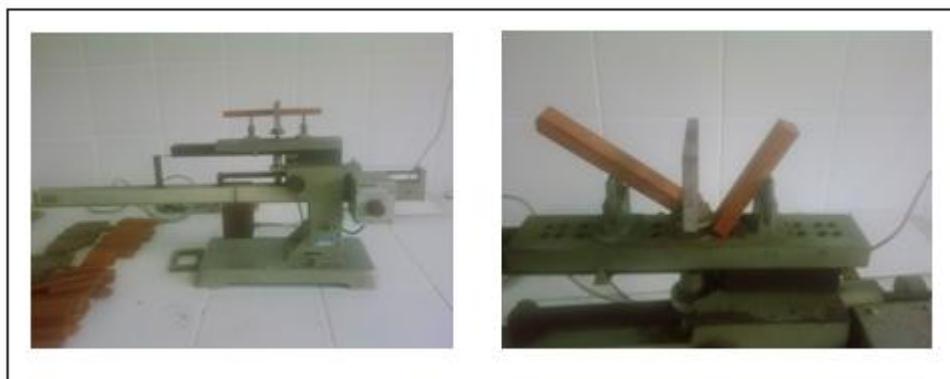
Os resultados foram obtidos pela média aritmética de quatro valores em corpos de prova distintos.

4.2.3.5 – Tensão de ruptura à flexão

Os ensaios são realizados com a finalidade de definir a aplicação da matéria prima para uso cerâmico, determinar a temperatura ideal de queima e controlar o produto após secagem e queima.

Para os ensaios de resistência à flexão, foi utilizada a máquina NETZSCH, modelo 401 (Figura 4), onde foi acoplado um dispositivo para ensaios de flexão em três pontos, onde a distância entre apoios foi mantida fixa para todos os ensaios. Os ensaios foram realizados de acordo com a ABNT/NBR 13818: 1997 (anexo C).

Figura 4 - Ensaio de tensão de ruptura a flexão.



Fonte: Fotos do autor, 2011.

A tensão de ruptura foi determinada a partir da equação 5 descrita abaixo:

$$\text{TRF}_{(\text{MPa})} = (3 \cdot P \cdot L) / (2 \cdot b \cdot h^2) \quad (5)$$

Onde:

P = carga em Kgf atingida no momento de ruptura (Kgf)

L= distância em cm entre os apoios do corpo de prova (cm)

b = largura em cm do corpo de prova (cm)

h= altura em cm do corpo de prova (cm)

Os resultados foram obtidos pela média aritmética de quatro valores em corpos de prova distintos.

4.2.4 – Caracterização microestrutural (MEV)

As amostras estudadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram analisadas no microscópio SHIMADZU SS-550 do Departamento de Química Fundamental do Campus da UFPE Recife. As análises foram realizadas com o intuito de verificar o efeito da incorporação de cinzas no processo de densificação da massa cerâmica utilizada nesse trabalho. Com esta finalidade, fragmentos de corpos de prova com 0% e 15% de cinza foram recobertos com ouro e observados no modo de elétrons secundários com aumento de 1500X e 5000X. Foram escolhidos os corpos de prova queimados a 950 °C, pois representam a temperatura de queima ideal dos fornos industriais.

5 – RESULTADOS

5.1 – Análise Química (FRX)

A Tabela 2 apresenta os resultados de composição química obtidos por fluorescência de raios-X, umidade e perda ao fogo da massa cerâmica e da cinza utilizados neste trabalho.

Tabela 2 – Composição química da massa cerâmica e da cinza utilizada no trabalho.

| Composição química | % | |
|--------------------------------|----------------|---------------|
| | Massa cerâmica | Cinza |
| Al ₂ O ₃ | 25,89 | 3,93 |
| SiO ₂ | 52,50 | 10,44 |
| P ₂ O ₅ | 0,19 | 5,32 |
| Cl | * | 3,70 |
| ZrO ₂ | 0,06 | * |
| SO ₃ | 0,15 | 2,73 |
| K ₂ O | 3,04 | 16,08 |
| TiO ₂ | 1,19 | 0,52 |
| CaO | 1,04 | 30,62 |
| Y ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 |
| NbO | 0,00 | * |
| MnO | 0,07 | 0,36 |
| Br | * | 0,02 |
| Fe ₂ O ₃ | 6,81 | 1,92 |
| Rb ₂ O | 0,01 | 0,03 |
| ZnO | 0,01 | * |
| SrO | 0,02 | 0,28 |
| Na ₂ O | 0,00 | 2,33 |
| MgO | 1,14 | 15,28 |
| Umidade | 2,76 | 1,28 |
| Perda ao fogo a 550C | 5,78 | 5,16 |
| Total | 100,00 | 100,00 |

(*) Não determinado.

Fonte: Tabela do autor, 2012.

Como pode ser observado na Tabela 2, a massa cerâmica industrial é predominantemente constituída por SiO₂ (52,5%), Al₂O₃ (25,89%), Fe₂O₃ (6,81%) e K₂O (3,04%). Segundo Souza Santos (1989), o elevado teor de óxido de silício (SiO₂)

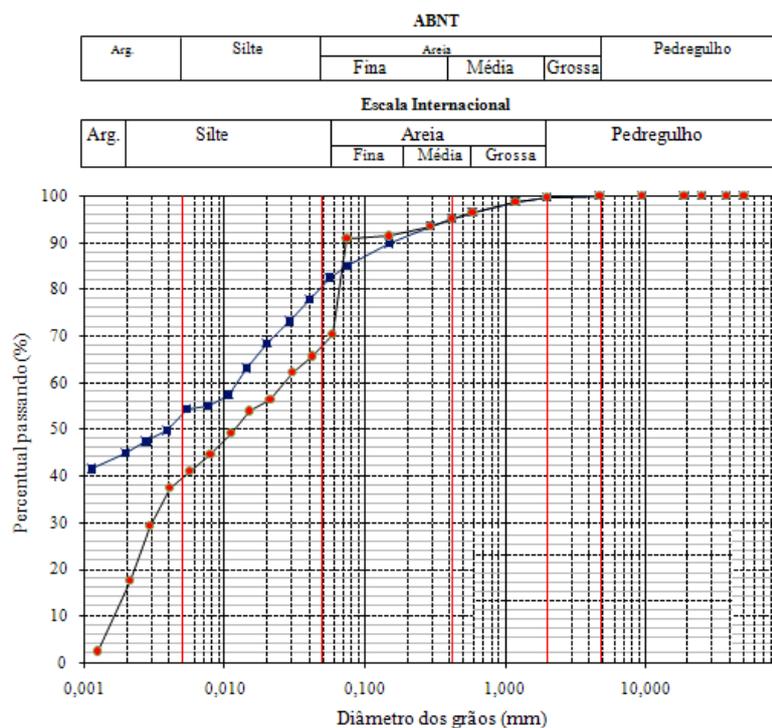
está relacionado à presença do quartzo (SiO_2) e da caulinita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_2$) e outros minerais que possuem silício na sua composição, o óxido de alumínio (Al_2O_3) que está associado também a caulinita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_2$), óxido de ferro (Fe_2O_3) responsável pela coloração vermelha do material, assim como o óxido de titânio (TiO_2) que está relacionado à variação da cor após a queima.

Na cinza, os principais óxidos constituintes foram: CaO (30,62%), K_2O (16,08%), MgO (15,86%), SiO_2 (10,44%). Esses óxidos podem ter efeito fundente na temperatura de queima por volta de 1100 °C, podendo contribuir para melhorar as propriedades tecnológicas do material na etapa de queima através da redução de porosidade (SOUSA SANTOS, 1989).

5.1 – Análise granulométrica

Os resultados das análises granulométricas da massa cerâmica industrial são mostrados na Figura 5.

Figura 5 - Curvas granulométricas da massa cerâmica industrial com defloculante (em azul) e sem defloculante (em vermelho).



Fonte: Figura do autor, 2011.

Observando a curva com defloculante e considerando a NBR 7181:1994, aproximadamente 54% do material na faixa granulométrica correspondente à fração

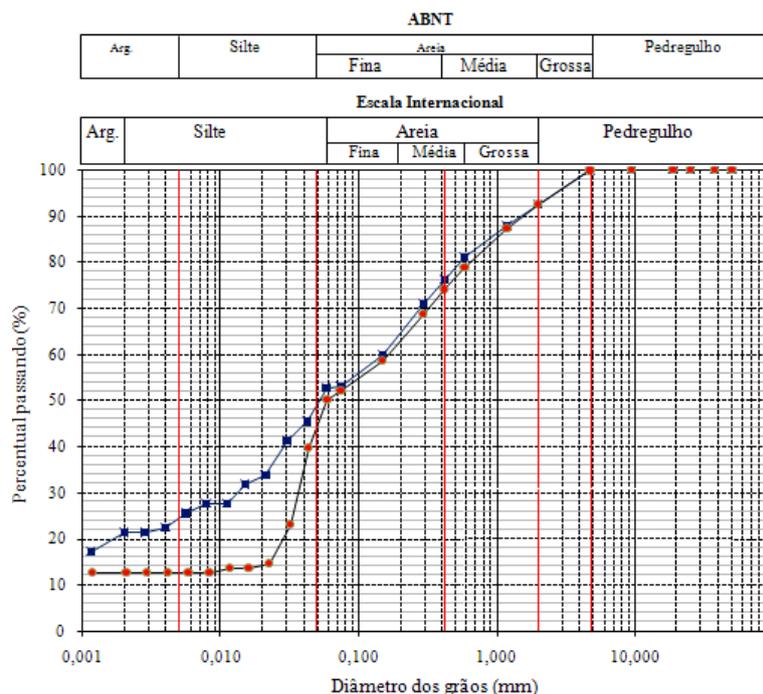
argila ($\emptyset < 0,005$ mm), e 28% aproximadamente da faixa granulométrica correspondente a silte ($0,005$ mm $< \emptyset < 0,05$ mm) e o restante do material (18%) com faixa granulométrica superior a 0,05 mm.

Segundo Villanova (2010), a distribuição granulométrica tem influência na trabalhabilidade em corpos cerâmicos: alta porcentagem de matéria fina exige aumento da água de amassamento e, conseqüentemente de argila, para o mesmo fator água/argila tornando o produto cerâmico mais dispendioso. Temos que considerar ainda o material superior a 0,076 mm que misturam com o argila criando descontinuidade no bloco e reduzindo a resistência. Por outro lado, os corpos cerâmicos sem o material fino são materiais pouco trabalháveis, sujeitos a maior permeabilidade e agentes agressivos.

O módulo de finura do agregado miúdo influencia na definição da quantidade de água e de argila, sendo quanto menor o módulo de finura será maior a quantidade de água necessária para o amassamento e também terá o aumento de argila para manter o fator água/argila conforme o preestabelecido.

Os resultados das análises granulométricas da cinza são mostrados na Figura 6.

Figura 6 - Curvas granulométricas da cinza com defloculante (em azul) e sem defloculante (em vermelho).



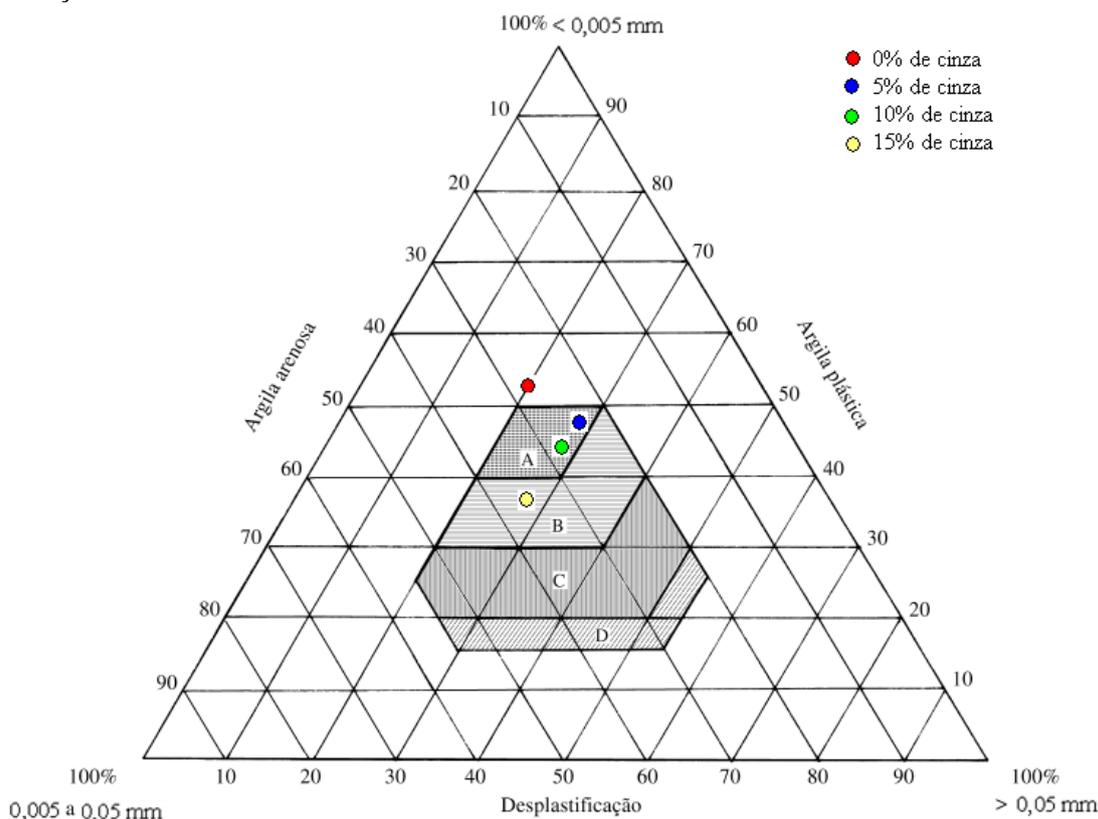
Fonte: Figura do autor, 2011.

Observando a curva granulométrica da cinza com defloculante, aproximadamente 25% do material na faixa granulométrica correspondente à fração

argila ($\emptyset < 0,005$ mm), e 22% aproximadamente da faixa granulométrica correspondente a silte ($0,005 \text{ mm} < \emptyset > 0,05$ mm) e o restante do material (53%) com faixa granulométrica superior a 0,05 mm.

O diagrama de Winkler como pode ser visto na Figura 7, é uma importante ferramenta para o processamento de cerâmica vermelha, pois, de acordo com a granulometria da massa cerâmica, pode-se prever sua recomendação para a fabricação de determinados tipos de produtos, ou na necessidade de mistura com outras matérias-primas para garantir uma trabalhabilidade ideal (MOTTA, 2001).

Figura 7 - Classificação ternária do diagrama de Winkler baseado na distribuição granulométrica de grãos e partículas em relação ao uso prático da massa cerâmica industrial. (A) Materiais de qualidade com dificuldade de produção; (B) telhas; (C) tijolos furados; (D) tijolos maciços.



Fonte: Figura adaptada de Winkler, 1954.

Como pode ser observado na Figura 7, a massa cerâmica referência (0 % de cinza), está mais próximo do vértice representado pela fração <math>< 0,005\text{mm}</math> e corresponde à massa cerâmica com maior percentual de mineral argiloso (fração argila 54%). Isso significa que as amostras que se localizam mais próximo deste vértice, apresentam maior plasticidade. Segundo Souza Santos (1989), esta plasticidade por um lado é benéfica no sentido de obtenção de peças com maior resistência mecânica. Por outro

lado, a maior plasticidade necessita de uma maior utilização de água, que dificulta a etapa de secagem. Na Tabela 3, é apresentada uma distribuição granulométrica em função dos principais produtos de cerâmica vermelha de acordo com o diagrama de Winkler.

Tabela 3 – Fração granulométrica ideal para os produtos de cerâmica vermelha, segundo Winkler (1954).

| TIPOS DE PRODUTO | FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA (%) | | |
|---|--------------------------------|--|-------------------------------|
| | $\emptyset < 0,005 \text{ mm}$ | $0,005 \text{ mm} < \emptyset < 0,05 \text{ mm}$ | $\emptyset > 0,05 \text{ mm}$ |
| A - MATERIAIS DE QUALIDADE COM DIFICULDADE DE PRODUÇÃO | 40 a 50 | 20 a 40 | 20 a 30 |
| B – TELHAS | 30 a 40 | 20 a 50 | 20 a 40 |
| C - TIJOLOS FURADOS | 20 a 30 | 20 a 55 | 20 a 50 |
| D - TIJOLOS MACIÇOS | 15 a 20 | 20 a 55 | 25 a 55 |

Fonte: Tabela adaptada de Winkler, 1954.

Conforme Tabela 4, as massas cerâmicas com cinzas apresentam granulometria em regiões apropriadas para a fabricação para a fabricação de tijolos, telhas e produtos de qualidade na indústria cerâmica vermelha.

Tabela 4 – Percentuais das frações granulométricas das massas cerâmicas estudadas.

| TEROR DE CINZA (%) | FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA (%) | | |
|--------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|
| | $\emptyset < 0,005 \text{ mm}$ | $0,005 \text{ mm} < \emptyset < 0,05 \text{ mm}$ | $\emptyset > 0,05 \text{ mm}$ |
| 0* | 54 | 28 | 18 |
| 5 | 48 | 27 | 25 |
| 10 | 46 | 29 | 25 |
| 15 | 35 | 37 | 28 |

(*) Massa cerâmica industrial (referência)

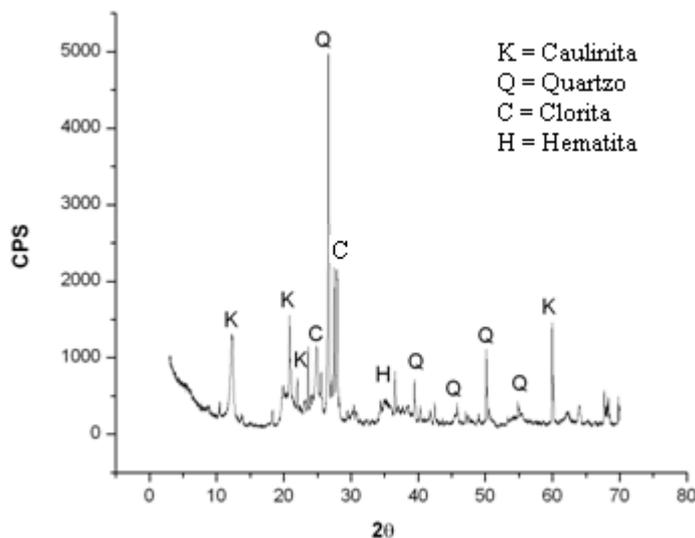
Fonte: Tabela do autor, 2011.

5.2 – Análise mineralógica (DRX)

De acordo com os difratogramas de raios X da massa cerâmica industrial em estudo (Figura 8), foi possível definir a presença das seguintes fases cristalinas: quartzo – SiO_2 , Caulinita – $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, hematita – Fe_2O_3 , e clorita – CaCO_3 . Estas fases

crystalinas são coerentes com os constituintes observados na análise química (Tabela 2), que mostrou a predominância de óxidos de silício, alumínio e ferro.

Figura 8 - Difratoograma de Raios-X da massa cerâmica industrial utilizada nas formulações cerâmicas.



Fonte: Figura do autor, 2011.

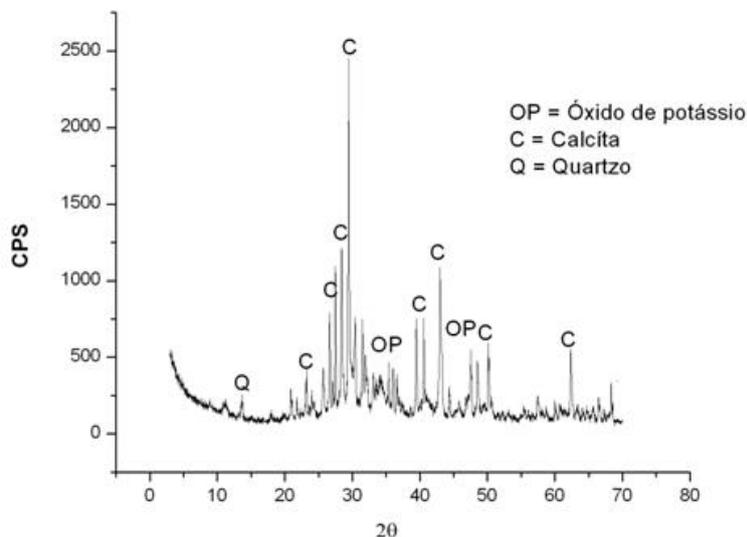
A presença de caulinita foi evidenciada pelos picos característicos em 2θ ($d'=7,19$, $d'=4,25$, $d'=1,53$). (Souza Santos, 1989). A existência de caulinita garante o desenvolvimento da plasticidade em mistura com água e ainda pode conferir ao material comportamento refratário após a queima (Souza Santos, 1989).

O quartzo foi detectado por linhas de difração em 2θ ($d'=3,33$, $d'=2,21$). Ele é uma impureza natural das argilas e atua como um material não plástico no sistema água/argila. O excesso do quartzo pode reduzir a resistência mecânica. Na etapa de queima, a maior parte do quartzo atua como inerte, podendo gerar microfissuras durante o resfriamento (SOUSA SANTOS, 1989).

A clorita foi detectada pelos picos em 2θ ($d'=3,59$, $d'=3,29$). A clorita segundo Sousa Santos (1989), pode se decompor na forma de carbonatos podendo retardar o processo de densificação dos corpos cerâmicos sinterizados acima de $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, podendo influenciar nas propriedades físico-mecânicas dos corpos sinterizados. Também foram encontrados traços de hematita em 2θ ($d'=2,53$), onde, a mesma é proveniente da desidratação da goetita e de eventuais hidróxidos de ferro amorfos presente da massa cerâmica (SOUSA SANTOS, 1989).

Analisando os picos do difratograma da cinza (Figura 9), verifica-se que a principal fase cristalina existente é a calcita (CaCO_3), observando-se também a presença de quartzo (SiO_2) e óxido de potássio (K_2O).

Figura 9 - Difratograma de Raios-X da cinza utilizada nas composições das massas cerâmicas.



Fonte: Figura do autor, 2011.

A calcita se apresenta de forma bem intensa e bem definida em 2θ ($d' = 3,16$; $d' = 3,03$, $d' = 3,16$). Em esses picos estão de acordo com a análise química da massa cerâmica (Tabela 2). Segundo a análise química, o principal constituinte é óxido de cálcio, que de acordo com os dados de DRX está na forma de carbonato de cálcio podendo formar porosidade secundária desenvolvida pela liberação de CO_2 , resultante da decomposição térmica dos carbonatos. Esta informação sugere que o teor de cinzas a ser incorporado à massa cerâmica estará limitado pelos efeitos da decomposição desta fase cristalina durante o processamento térmico dos corpos de prova.

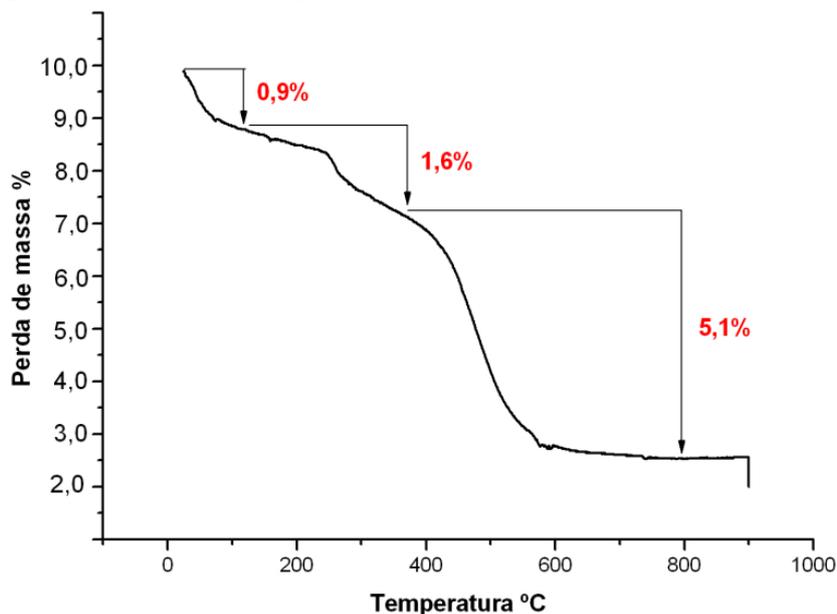
O óxido de potássio também foi identificado em 2θ ($d' = 2,12$; $d' = 1,92$) nas cinzas e pode atuar como fundente durante a etapa de queima das peças cerâmicas (superior a $1000\text{ }^\circ\text{C}$), reagindo com as fases amorfas e formando fases cristalinas que são mais estáveis (PEREIRA, 2010).

Foi encontrado traço de quartzo em 2θ ($d' = 6,46$), a presença de quartzo na cinza pode ter sido devido a algum tipo de impureza introduzido na cinza na hora da coleta da mesma.

5.3 – Análise termogravimétrica (TG)

Na Figura 10, é mostrada a curva obtida com análise termogravimétrica da massa cerâmica industrial.

Figura 10 - Análise termogravimétrica (TG) da massa cerâmica industrial.



Fonte: Figura do autor, 2011.

Segundo Sousa Santos (1975), uma argila submetida a análise termogravimétrica comporta-se com sucessivas perdas de massa, que correspondem a desidratação da caulinita (por volta de 110 °C), oxidação da matéria orgânica (entre 110 °C e 400 °C) e a desidroxilação da caulinita (entre 400 °C e 800 °C). No estudo realizado, houve perdas de massa de 0,9% por volta de 110°C, de 1,6% no intervalo de 110 °C a 400 °C e de 5,1% no intervalo de 400 °C a 800 °C, que são atribuídas as transformações sugeridas por Sousa Santos (1975).

5.4 – Limites de consistência

O limite de plasticidade (LP) indica a quantidade mínima de água necessária para se fazer a moldagem de uma massa. Segundo Más (2002), a quantidade de água para extrusar é em torno de 22% a 25%. Já o limite de liquidez (LL) representa o máximo de água que deve ser adicionada ao material sem que ele perca a consistência plástica. O índice de plasticidade (IP) representa a diferença entre o limite de liquidez e

limite de plasticidade, ou seja, representa a quantidade de água que ainda pode ser adicionada a partir do limite de plasticidade, sem alterar o estado plástico da argila ou massa cerâmica. O índice de plasticidade considerado mínimo é de 10% (Abajo, 2000).

Os resultados de limites de Atterberg para a massa cerâmica industrial sem e com a incorporação da cinza (5%, 10% e 15%) são mostrados na Tabela 5. Não foi possível determinar o limite de consistência do resíduo puro (cinza), pois o mesmo não possui característica plástica.

Tabela 5 - Limites de consistência com suas respectivas classificações segundo Bruguera (1986).

| TEROR DE CINZA (%) | LIMITES DE CONSISTÊNCIA (%) | | | CLASSIFICAÇÃO |
|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|
| | LIMITE DE LIQUIDEZ | LIMITE DE PLASTICIDADE | ÍNDICE DE PLASTICIDADE | |
| 0* | 43,60 ± 0,1 | 19,80 ± 0,1 | 23,80 | ALTAMENTE PLÁSTICO (IP > 15) |
| 5 | 49,08 ± 0,1 | 24,84 ± 0,1 | 24,24 | ALTAMENTE PLÁSTICO (IP > 15) |
| 10 | 44,50 ± 0,2 | 24,62 ± 0,1 | 19,88 | ALTAMENTE PLÁSTICO (IP > 15) |
| 15 | 43,00 ± 0,1 | 24,38 ± 0,1 | 18,62 | MEDIANAMENTE PLÁSTICO (IP < 15) |

(*) Massa cerâmica industrial (referência)

Fonte: Tabela do autor, 2011.

Os resultados apresentados na tabela acima concordam com a análise granulométrica, que evidenciou que a cinza apresenta partículas maiores do que a massa cerâmica e, portanto, demanda uma quantidade de água menor do que a argila.

A massa cerâmica industrial em estudo (referência) apresenta limite de liquidez igual a 43,6 e limite de plasticidade igual a 19,8, gerando um índice de plasticidade de 23,8, caracterizando que a massa cerâmica é altamente plástica (IP > 15%), isto é, faz-se necessário adicionar uma grande quantidade de água para desenvolver uma boa plasticidade.

A composição massa cerâmica + 15% de cinza apresentou limite de liquidez igual a 43, limite de plasticidade igual a 24,38 e índice de plasticidade igual a 18,62. A adição de cinzas reduz o valor do índice de plasticidade das formulações cerâmicas. Nota-se que a cinza está atuando como desplastificante, pois ela está reduzindo o grau de compactação da massa, diminuindo a plasticidade da argila tornando o sistema mais

líquido e, portanto, mais trabalhável. Segundo Sousa Santos (1975), A “água de plasticidade” é a quantidade de água necessária para tornar uma argila suficientemente plástica para ser moldada, geralmente por extrusão. Quanto mais plástica é uma argila maior é a água de plasticidade e também o limite de plasticidade, ou seja, mais água é necessária para formar uma massa plástica e também o limite de plasticidade. A água de plasticidade para moldagem por extrusão é igual ou superior ao limite de plasticidade da mesma argila, porém inferior ao limite de liquidez.

Todas as massas cerâmicas com cinzas apresentaram índice de plasticidade (demanda de água) menor do que a massa cerâmica referência (24%). Para manter constante a relação de água/massa adotou-se 25% de água para todas as misturas, uma vez que esta quantidade de água está abaixo do limite de liquidez para todos os casos, e que mantém o sistema plástico, portanto, extrudável. Este percentual de água está de acordo com as observações de Más (2002), que sugere o intervalo entre 22% a 25%.

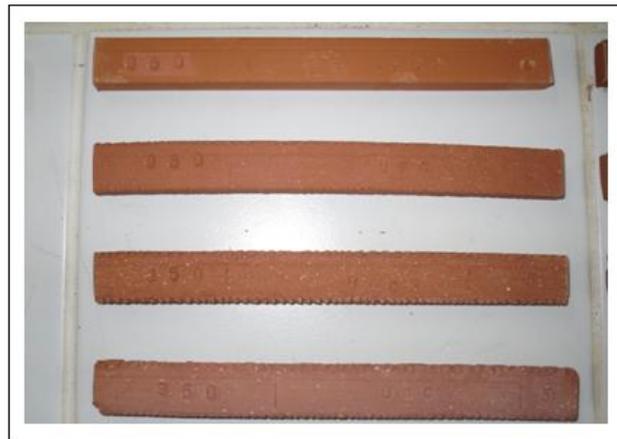
Essa argila depois de queimada possui alta resistência mecânica. As partículas internas são compactadas dificultava a eliminação da água no processo de secagem dos corpos de prova, conseqüentemente a umidade no interior dos corpos de prova causa retração.

5.5 – Ensaio de desempenho tecnológico

Os ensaios de desempenho tecnológico foram realizados nos corpos de prova calcinados a 850 °C, 900 °C e 1050 °C. As características cerâmicas dos corpos de prova produzidos com massa cerâmica industrial mais cinza foram comparadas com as características cerâmicas dos corpos de prova sem o resíduo, objetivando verificar a possibilidade de interferência da cinza.

A coloração dos corpos de prova após a queima em todas as temperaturas estudadas foi laranja avermelhado (Figura 11), para todas as massas cerâmicas com ou sem cinza, sendo a mesma aceitável do ponto de vista comercial. (Cor comparada com a Rock Color Chart - Geological Society of América - New York, 1984).

Figura 11 - Corpos de prova queimados em todas as temperaturas estudadas (de cima para baixo: 850 °C, 950 °C e 1050 °C).

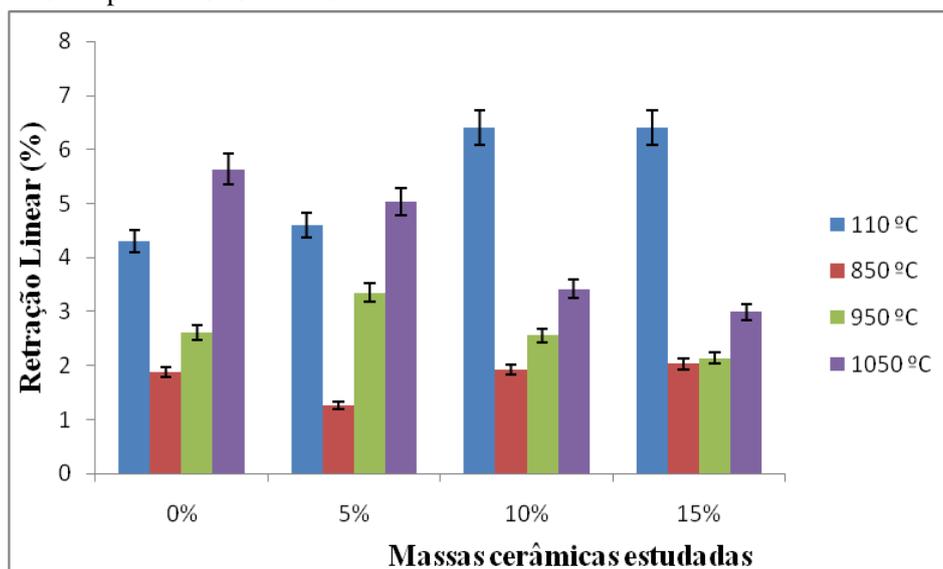


Fonte: Figura do autor, 2011.

5.5.1 – Retração linear de queima

Os valores de retração linear de queima são mostrados na Figura 12, onde pode ser observado o comportamento dimensional dos corpos de prova obtido com as formulações propostas em função do aumento da temperatura.

Figura 12 - Retração linear de queima dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Essa retração após a secagem (110 °C) é devido à eliminação da água utilizada na produção dos corpos de prova. Com o decorrer da perda de água, surgem os vazios

no corpo cerâmico. Devido à queima, a retração é consequência da sinterização do material.

Embora o ensaio da retração linear para a classificação de cerâmica vermelha não seja normatizado no Brasil, esses ensaios são parâmetros muito importantes a serem considerados, pois há uma relação direta entre porosidade e retração linear. Em geral, uma cerâmica com retração linear de queima maior que 3% é acompanhada de ganho de porosidade. Sousa Santos (1989) recomenda que os limites de retração linear para blocos cerâmicos não ultrapassem 10%, considerando-se, para isso, a soma das retrações lineares a 110°C e a da temperatura de queima.

Nas formulações estudadas, observa-se que os corpos de prova sofrem retração linear de queima a 950°C de 2,61% e 2,14% nas formulações com 0% e 15 % de cinza, respectivamente. A retração linear total (secagem + queima) destas massas cerâmicas foi de 6,91 e 8,54% respectivamente, sendo adequada (SOUSA SANTOS, 1989), considerando-se exclusivamente este parâmetro, para uso na fabricação de tijolos manuais, prensados, furados e telhas.

Na incorporação de 5% e 10% de cinza na temperatura de 1050 °C, a retração linear total (retração de linear de secagem + retração linear de queima) chegou a 9,63% e 9,82% respectivamente. Esses valores estão bem próximos do limite máximo recomendado por Souza e Santos (1989), (10%). Assim, deve-se atentar para o uso desse material para a fabricação de tijolos e telhas, em olarias que utilizem fornos industriais que não possuam um eficiente controle de temperatura, pois nesses casos algumas peças cerâmicas podem atingir temperaturas acima da temperatura de trabalho (1050°C) e perder conformidade.

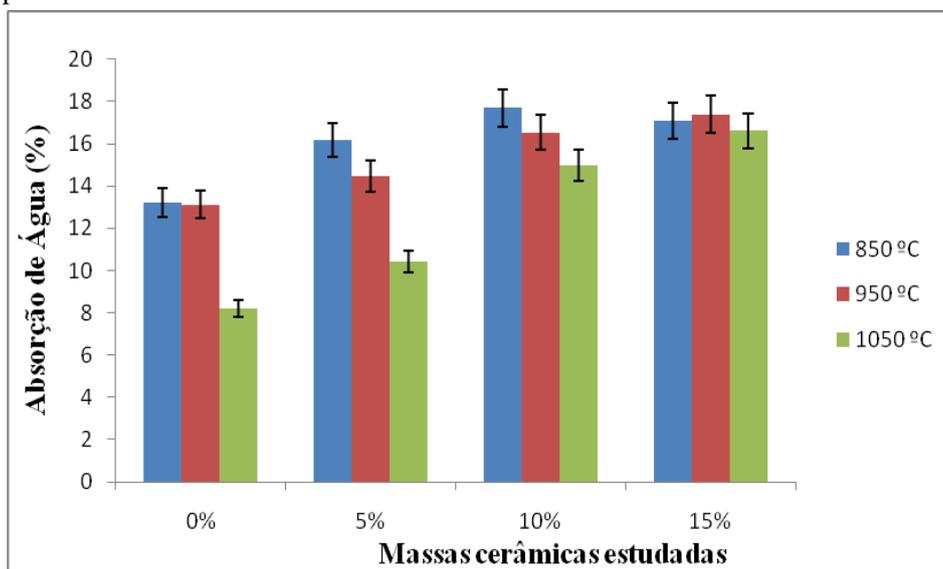
5.5.2 – Absorção de água

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

Segundo a ABNT/NBR 13818: 1997 (anexo B) para cerâmica vermelha, o valor máximo de absorção de água em tijolos furados e telhas deve ser 25% e 20% respectivamente, já para tijolos manuais e prensados a norma não especifica nenhuma exigência.

A Figura 13 apresenta os resultados de absorção de água de corpos de prova obtidos com composições de massa cerâmicas, em função das temperaturas de sinterização.

Figura 13 - Absorção de Água dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas.



Fonte: Figura do autor, 2012.

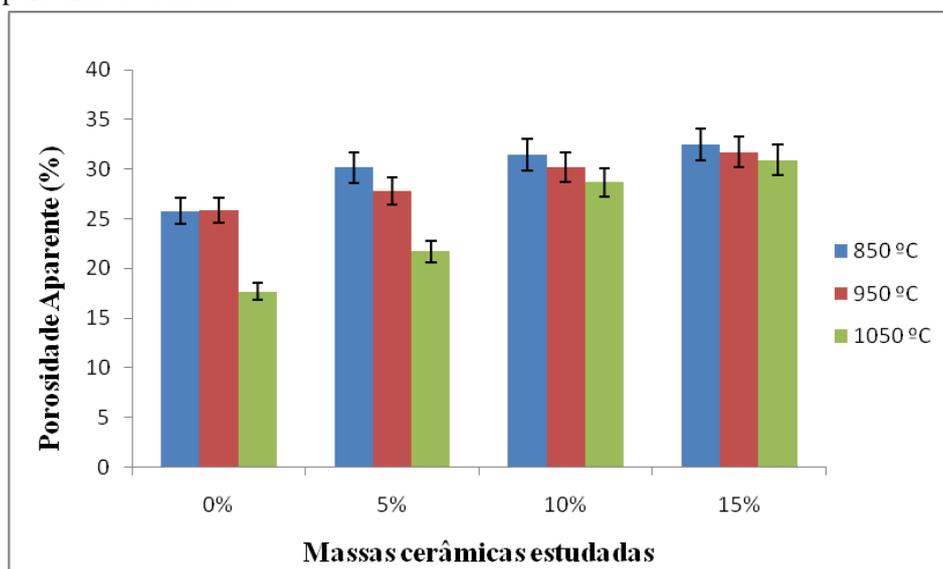
Observando a Figura 13, nota-se que a absorção de água nos corpos de prova obtidos apenas com massa cerâmica industrial a 950 °C foi de 13,11%. A absorção de água para corpos de prova obtidos com composição de 5% de cinza, na mesma temperatura, foi de 14,47%. Quando a incorporação de cinza foi de 15% observou-se um aumento de absorção de água para 17,39%, com desvio padrão de +/- 1,2, o que restringe um pouco a segurança para utilização desta concentração para a fabricação de telhas, considerando que o limite máximo estabelecido para este parâmetro é de 20%.

No que tange os corpos de prova obtidos com massa cerâmica industrial e cinza, nota-se que, com o aumento do teor de cinza, ocorre o aumento da capacidade de absorção de água pela matriz cerâmica em relação à referência. Isto possivelmente está relacionado à decomposição do carbonato de cálcio existente no resíduo, confirmado pelo DRX (Figura 8), onde sua decomposição inicia-se por volta de 850°C (Sousa Santos, 1989) resultando na formação de vazios, que podem permitir a infiltração de água. Entretanto, os corpos de prova com as formulações de 5%, 10% e 15% nas temperaturas de 850 °C e 950 °C estão dentro dos limites estabelecidos pela norma para este ensaio.

5.5.3 – Porosidade aparente

Na Figura 14, encontram-se os valores de porosidade aparente dos corpos de prova com massa cerâmica industrial com e sem cinza em função das temperaturas de sinterização.

Figura 14 - Porosidade aparente dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Nota-se que, em todas as composições, com o aumento da temperatura a porosidade aparente diminui. Esse comportamento é esperado para os materiais cerâmicos e está associado à densificação do material, que aumenta com a temperatura de processamento térmico. Por isso, foi observado que os valores de absorção de água, apresentados acima, reduziram com o aumento da temperatura. Entretanto, a presença de cinzas aumenta a porosidade da matriz cerâmica, possivelmente, em função da decomposição de carbonatos existentes no resíduo que interferem na compactação da microestrutura.

A densificação está relacionada ao aumento da fase líquida que irá preencher progressivamente os poros abertos, e, conseqüentemente provocar uma maior aproximação entre as partículas, resultando em retração dos corpos cerâmicos à medida que se aumenta a temperatura de sinterização.

A porosidade nas cerâmicas é um fator que pode ser prejudicial para o desempenho tecnológico, todavia facilita o processo de secagem e evita o aparecimento de defeitos mais comprometedores conseqüentes de gases formados durante a queima.

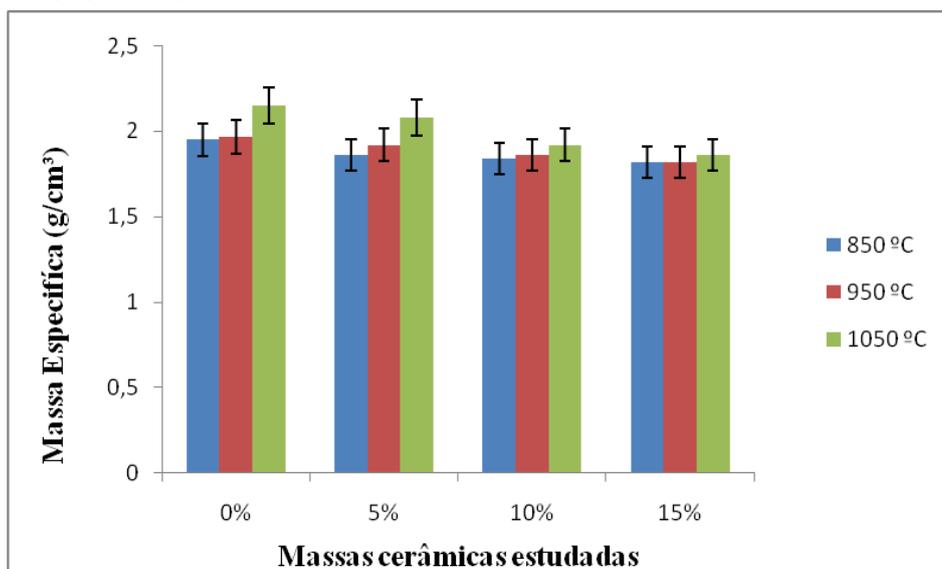
Apesar das formulações com cinza apresentarem valores de porosidade maiores do que a referência, não se observaram valores de absorção de água acima dos permitidos pela ABNT/NBR 6220: 2011, o que não limita a aplicação das cinzas na produção de cerâmica vermelha.

5.5.4 – Massa específica aparente

Segundo Sousa Santos (1975), o ponto de fusão dos argilominerais ocorre próximo a temperatura de 1000 °C, onde acontece a formação da fase líquida e a organização das partículas dentro do arranjo estrutural da cerâmica. Este fenômeno modifica as propriedades de fusão do maior percentual de argilominerais, influenciando no aumento de contatos e no preenchimento dos interstícios entre as partículas. É este processo de preenchimento dos interstícios, que ocorre durante o tratamento térmico, que aumenta a massa específica dos materiais cerâmicos e que é responsável por muitas propriedades desta classe de materiais.

Os valores médios da massa específica aparente das composições cerâmicas estudadas podem ser observados na Figura 15.

Figura 15 - Massa Específica dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas.



Fonte: Figura do autor, 2012.

A massa específica aparente varia entre 1,97 e 1,82 g/cm³ para os corpos de prova sinterizados a 950 °C. Com o aumento da temperatura de sinterização, observou-

se um ligeiro aumento da massa específica para todas as formulações, isto é, ocorreu um adensamento alcançado do material durante a fase de processamento. A presença de cinzas reduziu a densificação da massa cerâmica, o que era esperado em função dos resultados de absorção de água e porosidade. O grau de redução da massa específica observado nos corpos de prova com cinza não é prejudicial à aplicação do material como tijolos ou telhas, tendo-se em vista que, na temperatura utilizada nos fornos industriais (950°C), os parâmetros de absorção de água estão em concordância com os limites permitidos pela norma brasileira (NBR 13818: 1997).

5.5.5 – Tensão de ruptura a flexão

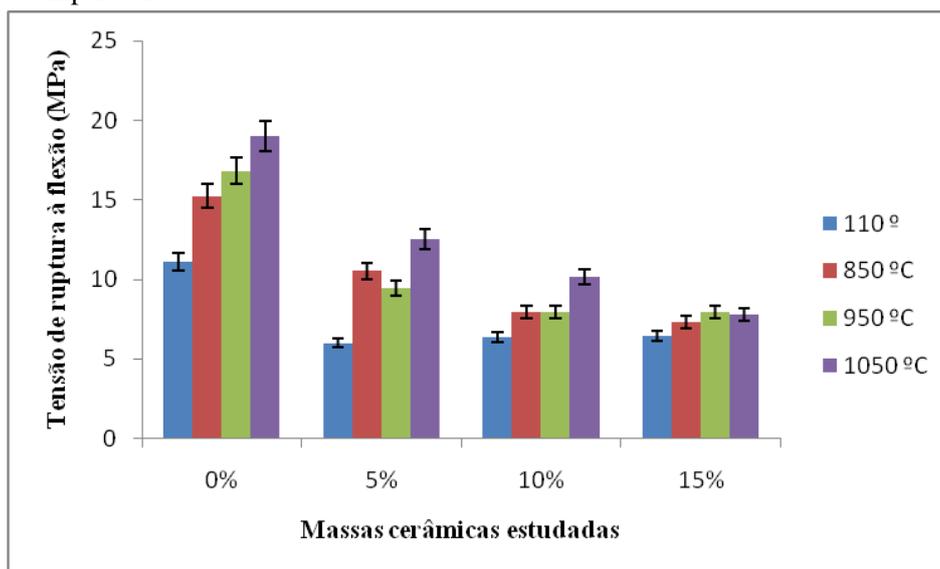
O material cerâmico seco tem uma força de coesão que é normalmente inferior àquela do produto queimado. Durante o aumento da temperatura de queima, antes mesmo de atingir a temperatura máxima (ideal), ocorrem modificações das fases cristalinas da argila; desse ponto em diante, não é mais possível a irreversibilidade do fenômeno de afinidade com a água (SOUSA SANTOS, 1975).

Na temperatura máxima, ocorrem reações químicas e com isso a formação de nova fase cristalina e fusões parciais (fase líquida) e, finalmente, consolidação do material através da formação de uma estrutura que em processo de resfriamento, se torna rígido e com mais resistência que o material seco (SOUSA SANTOS, 1975).

A resistência mecânica é uma propriedade das argilas de grande interesse para os ceramistas, possibilita o processamento das peças cerâmicas sem que se quebrem. A verificação da resistência à ruptura é feita por meio do ensaio de flexão a três pontos. E é definida por unidade de área necessária para romper um corpo, expressa em MPa.

Os valores de tensão de ruptura à flexão podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 - Tensão de Ruptura à Flexão dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas.



Fonte: Figura do autor, 2012.

Os valores de tensão de ruptura à flexão mostram relação inversa com os valores da absorção de água e porosidade aparente dos corpos cerâmicos quando da elevação da temperatura de queima. Isto indica que a razão principal para o aumento da resistência mecânica em cerâmica vermelha é a redução da porosidade aberta no interior da peça cerâmica.

Segundo Sousa Santos (1989), esse comportamento está relacionado à formação da fase cristalina na composição da massa cerâmica, que assume papel de fundente auxiliando a densificação e proporcionando o fechamento dos poros abertos.

O valor mínimo de tensão de ruptura à flexão da massa seca a 110 °C de acordo com a ABNT/NBR 13818: 1997 (anexo C) para tijolos manuais e prensados é de 1,47 MPa, para tijolos furados é de 2,45 MPa e telhas é de 2,94 MPa. Após a queima (950 °C), esse valor vai para 1,96 MPa para tijolos manuais e prensados, 6,37 MPa para tijolos furados e 9,81 MPa para telhas. Todas as massas cerâmicas apresentaram TRF de secagem acima do exigido pela norma, e os valores das composições com cinzas foram sempre menores do que a referência.

A redução de tensão de ruptura à flexão foi observada nas massas cerâmicas com cinzas também após a etapa de queima dos corpos de prova. Os menores valores de tensão de ruptura à flexão de queima observados foram 7,97 e 7,32 MPa, nas composições 10% e 15% de cinza, respectivamente, na temperatura de 850 °C, em função das maiores concentrações do resíduo. A primeira composição (10% de cinza)

apresentou um ganho crescente no valor de resistência, nas temperaturas de 950°C para 1050°C de 2,17 MPa (27,16%).

Na temperatura de 1050 °C, observou-se a maior tensão de ruptura para todas as composições com cinza, pois nessa temperatura há a formação da fase líquida e, conseqüentemente, maior desinfiliação do material. A explicação para este efeito está na decomposição térmica do carbonato de cálcio presente na cinza resultando em porosidade na microestrutura e na redução da quantidade de material argiloso que resultaria em uma fase vítrea densificada.

A Tabela 6 apresenta de forma resumida as possíveis utilizações ou não dos corpos de prova para a fabricação de tijolos e telhas obtidos com composições de massa cerâmicas de acordo com a norma ABNT/NBR 13818:1997, em função das temperaturas de sinterização.

Tabela 6 - Avaliação da aplicabilidade de corpos de prova cerâmicos contendo diferentes percentuais de cinza nas temperaturas estudadas.

| ESPECIFICAÇÕES | | 0% | 5% | 10% | 15% |
|---|----------------------|----|----|-----|-----|
| TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO A 110 °C (Tijolos manuais e prensados) | 1,47 MPa (Mínimo) | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO A 110 °C (Tijolos furados) | 2,45 MPa (Mínimo) | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO A 110 °C (Telhas) | 2,95 MPa (Mínimo) | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO A 950 °C (Tijolos manuais e prensados) | 1,96 MPa (Mínimo) | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO A 950 °C (tijolos furados) | 6,37 MPa (Mínimo) | ■ | ■ | ■ | ■ |
| TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO A 950 °C (Telhas) | 9,81 MPa (Mínimo) | ■ | ● | ● | ● |

Possível ■
Inadequado ●

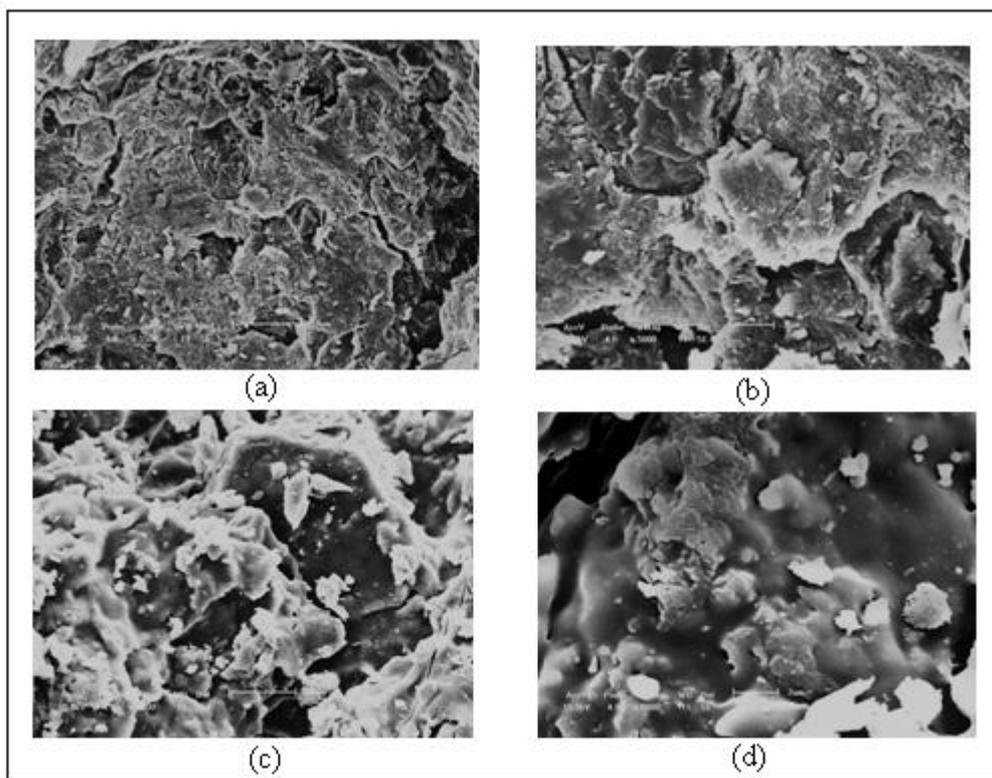
Fonte: Tabela do autor, 2012.

Com base nos resultados, o teor de incorporação de 5%, 10% e 15% de cinza, ficaram inadequados para a fabricação de telhas, sendo possível ser utilizado na fabricação de tijolos manuais, prensados e furados.

5.6 – Caracterização microestrutural (MEV)

A Figura 17 apresenta as micrografias obtidas por MEV da superfície dos blocos cerâmicos com e sem a introdução de cinza, sinterizados a 950°C.

Figura 17 - Microscopia por MEV da superfície dos corpos de prova cerâmicos queimados a 950°C. (a) massa cerâmica (referência) aumentada 1500x; (b) massa cerâmica (referência) aumentada 5000x; (c) 15% de cinza aumentada 1500x; (d) 15% de cinza aumentada 5000x.



Fonte: Figura do autor, 2011.

Observa-se, na Figura 17, que a amostra de referência (a) sofre o processo de densificação acompanhado da formação de alguns poros, o que justifica os resultados de absorção de água e de porosidade (Figura 13 e 14). Essa porosidade está relacionada ao surgimento de bolhas de gases no processo de fabricação dos corpos de prova (SOUSA SANTOS, 1975). Quando ocorre a introdução de cinzas na composição, a matriz cerâmica apresenta poros maiores e uma microestrutura menos homogênea. Tais poros estão relacionados aos fenômenos de decomposição térmica do carbonato de cálcio presente nas cinzas, o que interfere na qualidade da sinterização do material e sendo responsável pela perda de desempenho tecnológico.

A presença de poros nas amostras aumenta a absorção de água após a sinterização e, conseqüentemente, diminui a resistência mecânica, quando comparada com a massa sem adição de cinza (Figura 16).

6 – CONCLUSÃO

- A Massa cerâmica industrial (referência), possui 54% do material que esta na faixa correspondente a fração argila, mostrando que essa massa é adequada para a produção de material cerâmico.

- A cinza restante possui 53% do material com faixa granulométrica superior a 0,05 mm o que atuou como desplastificante na medida em que foi sendo incorporada a massa cerâmica (5, 10 e 15%), reduzindo o grau de compactação das massas, diminuindo a plasticidade da argila onde tornou o sistema mais trabalhável.

- A retração linear total de queima a 950 °C para todas as formulações estudadas foi menor que 10%, sendo adequada, exclusive para esse parâmetro, para a fabricação de material cerâmico.

- A retração linear total de queima a 1050 °C para todos os corpos de prova (inclusive a referencia) teve retração linear de queima aproximadamente 10%, ou seja, para fornos cerâmicos que não tem um rigoroso controle na sua temperatura pode ficar inviável para a produção de tijolo e telha.

- A diminuição da resistência mecânica com a incorporação de cinza pode ser devido à presença da calcita no resíduo (cinza), na liberação dos carbonatos aumentando a porosidade do material e conseqüentemente, aumento da absorção de água, diminuindo a resistência mecânica dos corpos de prova em todas as formulações estudadas.

- Os resultados de MEV indicaram que com o aumento do percentual de cinza aumenta a quantidade de poros presentes na amostra, justificado pelo aumento da absorção de água após a sinterização e diminuição da resistência mecânica, quando comparada com a massa sem adição de cinza.

- De acordo com as normas brasileiras (NBR/ABNT: 13818: 1997 e 6220: 2011), é seguro afirmar que, a incorporação da cinza da lenha aveloz, estudada nesse trabalho, à massa cerâmica industrial, é completamente viável para a produção de tijolos manuais,

prensados e furados na concentração até 15%, na temperatura normal de trabalho (950 °C), sendo inadequado para a fabricação de telhas.

- Com relação ao meio ambiente, a incorporação de cinza dos fornos cerâmicos proveniente da queima de madeira, é uma alternativa economicamente viável e resolve o problema de disposição final desse resíduo.

7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve por objetivo, avaliar a influencia de cinza de Aveloz geradas em uma indústria cerâmica de Caruaru – PE, e as características tecnológicas das massas cerâmicas usadas na fabricação de tijolos e telhas. Contudo, a pesquisa foi somente em escala de laboratório, assim sugerem-se outros temas a serem pesquisados a partir dessa dissertação:

- Realizar ensaios piloto em uma cerâmica para produção de Tijolo incorporado com cinzas de aveloz em tamanho real, dos produtos recomendados;
- Investigar a durabilidade dos produtos obtidos;
- Investigar a possibilidade de formação de patologias, como salinidade.

8 - REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas. **Análise granulométrica**. NBR 7181-1984.

ABNT. Associação Brasileira de Normas. **Determinação do limite de plasticidade**. NBR 7180-1984.

ABNT. Associação Brasileira de Normas. **Determinação do limite de liquidez de solos**. NBR 6459-1984.

ABNT. Associação Brasileira de Normas. Materiais densos conformados. **Determinação de densidade, Massa específica aparente, Porosidade aparente, Densidade aparente da parte sólida** – NBR 6220-2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas. Placas cerâmicas para revestimento. **Especificações e métodos de ensaio**. NBR 13818-1997

ANICER. **Associação Nacional da Indústria Cerâmica**. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br/>>. Acesso em 17 mar. 2011

ANFACER. Associação nacional dos fabricantes de cerâmicas para revestimento. **Guia de assentamento de revestimento cerâmico**. Disponível em: www.anfacer.org.br – acesso em Nov. de 2011.

ARRUDA, R. L. S.; MARIBONDO, R. N. **O Processo Produtivo e a Qualidade do Produto Cerâmico Estrutural**. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa-PB. 2007.

BORLINI, M. C. *et al.* **Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. parte I: características da cinza**. 2005, vol.51, n.319, pp. 192-196.

BORLINI, M. C. *et al.* **Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar**. *Matéria (Rio J.)*. 2006, vol.11, n.4.

BRUGUERA, J. **Manual Práctico de Cerâmica**. Ediciones Omega S.A., Barcelona, 1986.

CAMPOS, C. P., 2001 - **A Conservação das Florestas no Brasil, Mudança do Clima e o MDL do Protocolo de Quioto**. Tese de MSc., Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001, p. 181.

CAMPOS, L. F. A. **Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural**. *Cerâmica*. 1999, vol.45, n.295, p. 140-145.

CAMPREGHER, N. **Estudo de viabilidade da incorporação do lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel, celulose e aparas em material cerâmico**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005, UFSC, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

CASTRO, N. **Análise das Possibilidades de Expansão do Uso do Gás Natural na Indústria Cerâmica Brasileira**. Rio de Janeiro: BGN nº2 , IE - UFRJ, Fevereiro de 2005.

CASTRO, R. S. **Formulação e caracterização de matérias-primas para revestimento cerâmico Semi-Poroso com adição de chamote de telhas**, 2008. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

CAMPOS, V. A. S. **Incorporação de lodo e cinzas provenientes de lavanderia de jeans de Caruaru em materiais cerâmicos**, 2011. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2011.

CHANDLE, R.J., HARWOOD, A.H., SKINNER, P.J. **Sample disturbance in London Clay. Géotechnique.** p. 577-585, 1992.

CHIH-HUANG WENG; DENG-FONG LIN; PEN-CHI CHIANG, **Utilization of sludge as brick materials,** Advances in environmental research, 2003. p.679-685.

CHAIRMAN, E. N. G. & Trask, P. D. & Ford, R. K. & Rove, O. N. & Singewald Jr, J. T. & Overbeck, R. M. 1984. **Rock Color Chart.** Colorado: Geological Society of America, 10 p.

CINCOTTO, M.A.; KAUPATEZ, R.Z. **Seleção de materiais quanto à atividade pozolânica.** In: Tecnologia de Edificações. São Paulo, SP. Ed. IPT, 1988 p.23-26.

DASKALOPOULOS, O. e PROBERT, S. D.. **Economic and environmental Evaluations of Waste Treatment and Disposal Technologies for Municipal Solid Waste. Applied Energy.** v. 58, n. 4, p. 209-255, 1997.

DONDI, M., MARSIGLI, M., FABBRI, B.. **Recycling of industrial and urban wastes in brick production: a review.** Tile & Brick International, v. 13, n. 3, pp. 218-225, 1997.

FALCONI, V.. TQC, **Controle da qualidade total no estilo japonês.** 8. ed., Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial. 1999.

FERNANDES P. F.; **Reaproveitamento do lodo da estação de tratamento de tratamento de efluentes de uma indústria cerâmica.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, UFSC, Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais.

GOUVEIA, F. P. e SPOSTO, R. M.. **Incorporação de chamote em massa cerâmica para a produção de blocos: um estudo das propriedades físico-mecânicas.** Cerâmica. 2009, vol.55, n.336, p. 415-419.

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

HEREK C. S. L., **Estudo da Solidificação/Estabilização do Lodo da Industrial Têxtil em Material Cerâmico**. Revista Cerâmica Industrial. p. 41 a 46. Agosto 2005.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial**. PIA.Diponivelem<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/prodlist_industria/2006/> . Acesso em 14 ago. 2011.

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.

LUCENA, M. M. **Efeito da introdução de resíduos de cinza de forno cerâmico em massa para cerâmica estrutural**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

MARCOLIN, M., 2006. **Emissões e Remoções de Dióxido de Carbono por Mudança nos Estoques de Florestas Plantadas**. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito estufa do MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. FBDS – Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, Rio de Janeiro, 2006, p.35.

MARTINS, M. CASTELETTI, L. C. BONAVIDA, L. F.; FORTI, L. R. N. **Análise Microestrutural de Aços Inoxidáveis Altamente Ligados: Da Amostragem à Interpretação**. In: IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável- INOX 2008, 2008, São Paulo. Seminário INOX 2008. São Paulo: Núcleo INOX, 2008. p. 86-95.

MÁS, Edgar. **A queima cerâmica forno a forno**. São Carlos: UFSCAR: Pólo Produções, 2005.

MÁS, Edgar. **Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha**. São Carlos: UFSCAR: Pólo Produções, 2003.

MOTTA J. F. M.; ZANARDO A., CABRAL M.J., **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos**, Revista **cerâmica Industrial**. 2001. p. 29 e 32.

NASCIMENTO, Carmem Francisco. **Materiais Cerâmicos: Teoria e Aplicação**. Apostila. Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão. São Luis – MA, 2007.

NORTON F. H. **Introdução à Tecnologia das Cerâmicas**. Ed. da USP, São Paulo, SP 1973. OSAKI, F.M.R.; DAROLT. 1991. **Estudo da qualidade de cinzas vegetais para uso como adubos na região metropolitana de Curitiba**. fiev. Set Ciênc. Agr. 11

OSWALDO, K.T. **Aproveitamento do Lodo Gerado no Tratamento de Efluente da Indústria de Lavanderia Têxtil na Produção de Blocos de Cerâmica Vermelha**. Universidade Estadual de Maringá. Maringá – PR, 2008.

PARANHOS, R. J. S. **Aproveitamento de resíduos de cinza da cana de açúcar em massas cerâmicas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Natal. 2010.

PEREIRA, S. I. **Estudo da incorporação de cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto na formulação de massa de uma indústria cerâmica estrutural do sul-catarinense**. 2010. 13 f. TCC Artigo (Graduação em Tecnologia e Cerâmica) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

PROGESC – **Programa de Informações Básicas para gestão Territorial de Santa Catarina**: Fontes de Poluições – Criciúma - SC, 1995.

SABRAH, B.A.; EBIED, E.A. **Utilization of cement-dust as a substitute of some clay content in clay-sand**. **Interbrick, Freiburg**, v.1, p.5129-5137, 1987.

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

SOUSA SANTOS, P. **Tecnologias de Argilas, Fundamentos e Aplicações**, Editora Universitária, São Paulo, 1975.

SOUSA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia das Argilas**. 2ª edição revisada e ampliada. v.1,2 e 3. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1989.

SASSI, S.; **A indústria cerâmica mundial na era da globalização**. Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 7-14, mar./abr. 2006.

SENAI. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Brasil, 2007. Disponível em :< <http://www.sbrt.ibict.br> >. Acesso em: 15 jul 2010.

SCHULLER, D.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.. **Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas**. Cerâmica. 2008, vol.54, n.332, p. 435-442.

SCHWOB, M. R. V. **Perspectivas de difusão do gás natural na indústria brasileira de cerâmica vermelha**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SOUSA, S.J.G.; HOLANDA, J.N.F. **Avaliação das propriedades físico-mecânicas de uma massa cerâmica para revestimento poroso**. Cerâmica vol.51, n.317. São Paulo, 2005

VARELA, M. L. *et al.* **Otimização de uma metodologia para análise mineralógica racional de argilominerais**. 2005, vol.51, n.320, pp. 388-392.

VARELA, M. L. *et al.* **Otimização de uma metodologia para análise mineralógica racional de argilominerais**. 2005, vol.51, n.320. p. 388-392.

VILLANOVA, D.L., **Influência da Variação Granulométrica das Matérias-Primas nas Propriedades Tecnológicas em Corpos Cerâmicos a Base de Cinza Pesada de Carvão Mineral e Vidro Sodo-Cálcico**. Cerâmica industrial, 2010. p. 15-22.

WINKLER, H. G. F. **Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für Grobkeramische Erzeugnisse.** Berichte der Deutschen. Keramischen Gesellschaft v.31, p. 337-343, 1954.