

RICARDO GONÇALVES GAMA DA SILVA

INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE GESSO NA COMPOSIÇÃO DA MASSA
CERÂMICA PARA FABRICAÇÃO DE BLOCOS E TELHAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Orientadores: Prof. Dr. Washington Almeida Moura

Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves

FEIRA DE SANTANA – BAHIA

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

Silva, Ricardo Gonçalves Gama da

S583i Influência do resíduo de gesso na composição da massa cerâmica para fabricação de blocos e telhas / Ricardo Gonçalves Gama da Silva. – Feira de Santana, 2008.

xv, 118 f. : il. ; 29,7 cm.

Orientador: Washington Almeida Moura

Co-orientador: Jardel Pereira Gonçalves

Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, 2008.

INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE GESSO NA COMPOSIÇÃO DA MASSA
CERÂMICA PARA FABRICAÇÃO DE BLOCOS E TELHAS

Ricardo Gonçalves Gama da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada por:

Prof. Washington Almeida Moura (Orientador), D.Sc
Universidade Estadual de Feira de Santana

Prof. Jardel Pereira Gonçalves (Co - orientador), D.Sc
Universidade Federal da Bahia

Profa. Mônica Batista Leite Lima, D.Sc
Universidade Estadual de Feira de Santana

Prof. Normando Perazzo Barbosa, D.Sc
Universidade Federal da Paraíba

FEIRA DE SANTANA, BA - BRASIL

SETEMBRO DE 2008

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus e a todos que se fizeram presentes, que se preocuparam, que foram solidários, que torceram por mim. Mas bem sei que agradecer é sempre difícil. Posso cometer mais injustiças esquecendo pessoas que me ajudaram do que fazer jus a todas que merecem. O maior perigo que se coloca para o agradecimento seletivo não é decidir quem incluir, mas decidir quem não mencionar.

Se devo ser seletivo, então é melhor começar do início. Meu maior agradecimento a minha família (Pai, mãe, irmãos, mãe Judith, sogrinha, tios(as), cunhados(as), primos e sobrinhos) que merece poucas palavras, mas aquelas que me são mais caras. Obrigado por vocês existirem. Obrigado por depositarem em mim a confiança para todas as horas. Sei que vocês se orgulham por eu ter atingido uma etapa que nenhum outro de nós tinha atingido antes. Mas este orgulho que sentem por mim, converto numa obrigação de a cada dia ser mais digno de os representar.

Minha seleção, no âmbito acadêmico, deve também começar do início. Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Washington Almeida Moura na esperança de retribuir, com a seriedade de meu trabalho, a confiança em mim depositada e ao meu co-orientador Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves pela confiança depositada no meu trabalho de dissertação e a consideração de ter aceitado a orientação de minha dissertação. E a todos os Professores do PPGCEA que em suas aulas, nos permitiram espaços para discussão de algumas questões relevantes e importantes aqui desenvolvidas.

A meus amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com sua amizade e com sugestões efetivas para a realização deste trabalho, gostaria de expressar minha profunda gratidão.

Aos amigos do SENAI-BA – Dendezeiros, de Gerentes à técnicos da Área Tecnológica da Construção Civil (eternos colegas), especialmente aos amigos Francisco Nascimento e Marinalvo pela ajuda imprescindível no Laboratório de Cerâmica Vermelha.

A todos os amigos do LABOTEC – UEFS, técnicos, coordenadores, gerentes e em especial ao amigo Jorge do laboratório de solos pela ajuda prestimosa.

Aos amigos Jodiel e Jacimar da Cerâmica Simonassi, Cezar e Elizabeth da Cerâmica Nordeste e a Gilberto e Aildo da ProjectGesso pelo fornecimento de materiais para realização deste estudo.

A minha filha, amor maior, a qual pretendo ser exemplo de retidão, perseverança, coragem e fé.

E a Mariana, que por vezes deve ter detestado a mim e a este trabalho, pois ele sacrificou muitos momentos, que poderíamos ter desfrutado juntos, mas sempre incentivou, sempre apoiou e, o melhor de tudo, sempre me cobrou para que eu continuasse e concluísse mais esta etapa de nossas vidas que vamos construindo juntos.
TE AMO.

Dedico este Trabalho

À minha esposa, aos meus pais e irmãos pelo amor incondicional e apoio em todas as minhas investidas e a minha filha Ana Mariana pela inspiração, dedico-lhes essa conquista.

“Quando não há compaixão ou mesmo um gesto de ajuda, o que pensar da vida e daqueles que sabemos que amamos? Quem pensa por si mesmo é livre e ser livre é coisa muito séria. Não se pode fechar os olhos, não se pode olhar para trás, sem se aprender alguma coisa para o futuro.”

Renato Russo

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE GESSO NA COMPOSIÇÃO DA MASSA CERÂMICA PARA FABRICAÇÃO DE BLOCOS E TELHAS

Ricardo Gonçalves Gama da Silva

Setembro/2008

Orientador: Prof. Dr. Washington Almeida Moura

Co-orientador : Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

A reciclagem de resíduos, como materiais e componentes para a construção civil, pode gerar uma série de benefícios à sociedade, tais como: redução do custo da construção, do consumo de energia na produção de materiais e da emissão de poluentes. Outro importante benefício é a possível diminuição no consumo de matérias-primas. A indústria cerâmica é um dos sub-setores da construção civil e apresenta-se como uma das indústrias com maior potencial para aproveitamento de resíduos como substituição de parte da massa de argila utilizada como matéria-prima na produção de blocos e telhas. Um dos resíduos industriais com potencial de aproveitamento na indústria cerâmica para produção de materiais de construção é o resíduo de gesso (RG), proveniente dos revestimentos de parede, largamente utilizado na construção civil. O resíduo de gesso (RG) é obtido recolhendo as sobras e o material que cai durante a execução do revestimento de gesso. O RG deve ser recolhido antes que o mesmo seja contaminado com outros resíduos, devendo o mesmo ser triturado para redução da granulometria. Neste trabalho foi estudada a influência da substituição de parte da massa de argila por RG em relação às propriedades: retração linear, porosidade aparente, absorção de água, módulo de resistência à flexão, perda de massa ao fogo e cor. Foram produzidas quatro misturas (REF, 10%RG, 15%RG, 20%RG) que foram queimadas em três temperaturas (800, 900 e 1000°C). Os resultados demonstraram que é possível produzir materiais de cerâmica vermelha com até 15% de RG em substituição à argila.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

GYPSUM WASTE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF CERAMICS MASS
FOR MANUFACTURE OF BLOCK AND TILES

Ricardo Gonçalves Gama da Silva

September/2008

Advisor : Prof. Dr. Washington Almeida Moura

Co-advisor : Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves

Department: Civil and Environmental Engineering

The recycling of waste, as of materials and components for construction, it can generate a series of benefits to society, as: the reduction of cost of construction, consumption of energy in the production of materials, and emission of pollutants. Another important benefit is the possible decrease in the use of raw materials. The ceramics industry is one of the sub-sectors of construction and presents itself as one of the industries with the greatest potential for use of various wastes, as replacing part of the mass of clay used as raw materials in the production of blocks and tiles. One of the industrial waste with potential for use in the ceramics industry for production of building materials is the residue of gypsum (GW), from the wall coatings, widely used in building construction. The gypsum waste (GW) is obtained by collecting the rest and material that falls during the implementation of the coating of gypsum. The GW must be taken even contaminated with other waste and must be crushed for the same reduction in size. It was studied the influence of replacing part of the mass of clay by GW on ceramic properties: firing shrinkage, apparent porosity, water absorption, flexural rupture strength, loss of weight to fire and color. Four mixtures were produced (REF, GW 10%, 15% GW, 20% GW) that were burned at three temperatures (800, 900 and 1000°C). The results demonstrated that it is possible to produce of red ceramic until the limit of 15% of GW as clay replacement material.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS E TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS.....	7
1.2.1 Objetivo geral	7
1.2.2 Objetivos Específicos	7
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
2 MATERIAIS CERÂMICOS	9
2.1 CERÂMICA VERMELHA.....	10
2.1.1 Matéria-Prima	14
2.1.2 Processos Produtivos.....	18
2.1.3 Propriedades Cerâmicas.....	25
2.1.3.1 Propriedades Mecânicas	25
2.1.3.2 Propriedades Térmicas, Elétricas e Magnéticas	28
2.1.3.3 Propriedades Ópticas	28
3 GESSO	29
3.1 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO GESSO.....	29
3.1.1 Gesso Natural	29
3.1.2 Gesso Residual.....	31
3.1.3 Gesso para Construção Civil.....	32
3.2 HIDRATAÇÃO.....	34
3.3 MICROESTRUTURA	35
3.3.1 Microestrutura e fatores internos que a influenciam	35
3.3.2 Microestrutura e fatores externos que a influenciam.....	36
3.4 PROPRIEDADES	37
3.4.1 Isolamento térmico e resistência ao fogo.....	37
3.4.2 Isolamento acústico	38
3.4.3 Aderência ao substrato	38
3.4.4 Trabalhabilidade e moldabilidade.....	38
3.4.5 Propriedades Mecânicas.....	39
3.5 RESÍDUO DE GESSO.....	40

4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS	45
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
5.1 MATERIAIS E MÉTODOS	54
5.1.1 Argila.....	54
5.1.1.1 Caracterização da argila	55
5.1.1.1.1 Análise granulométrica	56
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA	57
5.1.1.1.2 Determinação dos limites de consistência	59
5.1.1.1.3 Massa específica	62
5.1.1.1.4 Análise química	63
5.1.2 Resíduo de gesso	64
5.1.2.1 Preparação da massa de argila com RG incorporado.....	65
5.1.2.2 Conformação e identificação dos corpos-de-prova.....	66
5.1.2.3 Secagem e queima dos corpos-de-prova	68
5.1.2.4 Propriedades e ensaios realizados	69
5.1.2.4.1 Retração linear de secagem e após queima.....	70
5.1.3 Absorção de água	70
5.1.4 Porosidade aparente	71
5.1.5 Perda de massa ao fogo.....	71
5.1.6 Módulo de resistência à flexão	72
5.1.7 Análise de cor	73
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
6.1 RETRAÇÃO LINEAR DE SECAGEM E APÓS QUEIMA.....	77
6.2 POROSIDADE APARENTE.....	81
6.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA	85
6.4 MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	88
6.5 PERDA DE MASSA AO FOGO (PMF)	93
6.6 COR APÓS SECAGEM E QUEIMA	97
7 CONCLUSÕES.....	99
7.1 QUANTO ÀS PROPRIEDADES CERÂMICAS AVALIADAS.....	99
7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	100
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
APÊNDICES	108

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1 – Principais setores cerâmicos, matéria-prima e processo de fabricação (MOTTA, 2001)	10
Quadro 2.2 – Nomenclaturas, critérios técnicos e jargão cerâmico (MOTTA, 2004)..	17
Quadro 3.1 – Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento (CANUT, 2006).....	31
Quadro 3.2 – Origem e nomenclatura de sulfatos residuais (ANTUNES, 1999)	32
Tabela 2.1 – Principais produtos por eixo de desenvolvimento na Bahia (SICM, 2005)	11
Tabela 2.2 – Seguintos cerâmicos e produção anual (BUSTAMANTE, 2000)	12
Tabela 2.3 – Equipamentos e quantidade de empresas por eixo de desenvolvimento na Bahia (SICM, 2005)	24
Tabela 2.4 – Resistência à flexão e módulo de elasticidade para dez materiais cerâmicos usuais (CALLISTER JR, 2002).....	26
Tabela 2.5 – Durezas Knoop aproximadas (carga de 100g) para sete materiais cerâmicos (CALLISTER JR, 2002)	28
Tabela 3.1 – Classificação do gesso para construção civil (NBR 13207, ABNT 1994)	34
Tabela 3.2 – Exigências químicas do gesso para construção civil (NBR 13207, ABNT 1994).....	34
Tabela 3.3 – Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil (NBR 13207, ABNT 1994).....	34
Tabela 3.4 – Intervalo de variação das propriedades do gesso no Brasil (ANTUNES, 1999).....	39
Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de sedimentação e peneiramento	57
Tabela 5.2 – Fração de material e classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995)	58
Tabela 5.3 – Limites de Atterberg e índice de plasticidade da argila utilizada	60
Tabela 5.4 – Resultados da análise química de argilas que compõem a jazida.....	63
Tabela 5.5 – Identificação dos corpos-de-prova.....	68
Tabela 6.1 – Retração linear de secagem e após queima.....	78
Tabela 6.2 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando na retração linear	79
Tabela 6.3 – Porosidade aparente dos corpos-de-prova queimados	82
Tabela 6.4 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando na porosidade aparente	83

Tabela 6.5 – Absorção de água dos corpos-de-prova queimados.....	85
Tabela 6.6 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando na absorção de água.....	86
Tabela 6.7 – Módulo de resistência à flexão dos corpos-de-prova após secagem e queima	90
Tabela 6.8 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando no MRF.....	91
Tabela 6.9 – Perda de massa ao fogo dos corpos-de-prova queimados.....	94
Tabela 6.10 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando na PMF	95
Tabela 6.11 – Cores após secagem e queima dos corpos-de-prova.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Taxonomia dos tipos de materiais cerâmicos (CALLISTER JR, 2002).....	9
Figura 2.2 – Quantidade de Cerâmicas por cidade na Bahia (SICM, 2005)	13
Figura 2.3 – Principais Pólos Mínero-Cerâmicos Potenciais da Região do Grande Recôncavo (SICM, 2005)	14
Figura 2.4 – Representação esquemática da estrutura cristalina dos principais argilominerais (SANTOS, 1989).....	16
Figura 2.5 – Principais bacias sedimentares brasileiras de argila (MOTTA, 2004).....	18
Figura 2.6 – Fluxograma das atividades na indústria de cerâmica vermelha.....	19
Figura 2.7 – Alterações estruturais que ocorrem no cozimento para um compactado de pós. (a) partícula de pós após prensagem; (b) Coalescência das partículas e formação de poros que ocorrem quando a sinterização tem início; (c) Com a progressão do processo de sinterização, os poros mudam de tamanho e forma (CALLISTER JR, 2002).....	23
Figura 2.8 – Comportamento típico tensão-deformação para o óxido de alumínio e o vidro (CALLISTER JR, 2002)	26
Figura 2.9 – Influência da porosidade sobre o módulo de elasticidade do óxido de alumínio (CALLISTER JR, 2002)	27
Figura 3.1 – Produção anual do Pólo Gesseiro (RIBEIRO, 2006).....	33
Figura 3.2 – À esquerda cristais dihidrato aumentados 8000X e a direita cristais dihidrato em presença de poliacrilamina aumentados 6500X (ANTUNES, 1999).....	36
Figura 3.3 – Efeito da relação água/gesso no módulo de elasticidade (ANTUNES, 1999).....	40
Figura 5.1 – Esteira com material após laminação.....	55
Figura 5.2 – Preparação da amostra e peneiramento. (a) secagem ao ar; (b) quarteamento; (c) peneiramento; (d) quantidade retida.....	56
Figura 5.3 – Ensaio de sedimentação. (a) pesagem; (b) agitação da proveta; (c) sedimentação; (d) peneiramento úmido.....	57
Figura 5.4 – Curva granulométrica conjunta da argila utilizada	58
Figura 5.5 – Determinação do limite de liquidez. (a) material colocado na concha; (b) retirada do excesso com espátula; (c) rasgo com sizel; (d) amostra para verificação da umidade.	59
Figura 5.6 – Determinação do limite de plasticidade. (a) equipamentos; (b) moldagem do cilindro; (c) amostra para determinação da umidade; (d) pesagem de uma amostra.	60
Figura 5.7 – Gráfico de plasticidade de Casagrande (VARGAS, 1977).....	61
Figura 5.8 – Determinação da massa específica. (a) pesagem da amostra; (b) materiais; (c) amostras prontas para fervura; (d) fervura.	62
Figura 5.9 – Aspecto do RG aderido às paredes do moinho	65
Figura 5.10 – Mistura com adição de água.....	66
Figura 5.11 – Conformação dos corpos-de-prova	67

Figura 5.12 – Marcação com gabarito dos corpos-de-prova	67
Figura 5.13 – Estufa para secagem (Laboratório de cerâmica do SENAI-BA)	68
Figura 5.14 – Forno tipo mufla com os CPs (Laboratório de cerâmica do SENAI-BA)	69
Figura 5.15 – Máquina universal de ensaios (Laboratório de cerâmica do SENAI-BA)	72
Figura 5.16 – Avaliação da cor em corpos-de-prova cerâmicos: a) CPs queimados a 1000°C e b) CPs queimados a 900°C.....	74
Figura 6.1 – DTA do rejeito de gesso de construção reciclado (SILVA et al, 2006)....	76
Figura 6.2 – Comportamento da retração linear das massas cerâmicas em função da temperatura de queima.....	78
Figura 6.3 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto a retração linear em função: (a) temperatura; (b) teor de RG; (c) interação dos fatores: temperatura e teor de RG.....	80
Figura 6.4 – Comportamento da porosidade aparente das massas cerâmicas em função da temperatura de queima.....	82
Figura 6.5 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto a porosidade aparente em função: (a) temperatura; (b) teor de RG	84
Figura 6.6 – Comportamento da absorção de água das massas cerâmicas em função da temperatura de queima.....	86
Figura 6.7 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto à absorção de água em função: (a) temperatura; (b) teor de RG; (c) interação dos fatores: temperatura e teor de RG.....	87
Figura 6.8 – Comportamento do MRF das massas cerâmicas em função da temperatura de queima.....	90
Figura 6.9 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto ao MRF em função: (a) temperatura; (b) teor de RG; (c) interação dos fatores: temperatura e teor de RG.....	92
Figura 6.10 – Comportamento da perda de massa ao fogo das massas cerâmicas em função da temperatura de queima.....	94
Figura 6.11 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto à PMF em função: (a) temperatura; (b) teor de RG; (c) interação dos fatores: temperatura e teor de RG.....	96

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos têm sido uma preocupação crescente, no que tange aos impactos ambientais e econômicos. Esta preocupação tem vários motivos, destacando-se a demanda por grandes áreas para destinação destes resíduos, a contaminação de lençóis freáticos, córregos, rios, solo, dentre outros.

Cerca de 2/3 da massa total dos resíduos gerados em cidades de médio e grande porte, são resíduos de construção e demolição (RCD) (PINTO apud LEITE, 2001). Nestas cidades, a quantidade da geração de RCD oscila entre 0,4 e 0,7 toneladas por habitante, por ano (LEITE, 2001). Somente na cidade de Salvador são geradas cerca de 5.517 toneladas por dia de resíduo sólido urbano, sendo deste 49,77% de RCD (LIMPURB, 2000 apud CARNEIRO et al., 2001).

Com o objetivo de disciplinar o tratamento de resíduos sólidos gerados na construção civil foi criada e está em vigor, desde 2003, a Resolução 307 do CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Para facilitar a caracterização e, posteriormente, definir os tratamentos para cada tipo de resíduo, a Resolução 307 os agrupou em quatro classes: Classe A – os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, formados por argamassa, concreto, tijolos, revestimentos cerâmicos, telhas e outros; Classe B – os recicláveis formados por plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros; Classe C – os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicação economicamente viáveis que permitam sua reciclagem; Classe D – os resíduos perigosos como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Várias soluções estão sendo estudadas para o tratamento dos diversos tipos de resíduos, sempre com vistas a redução da geração, utilização e reciclagem dos mesmos. No caso da impossibilidade dos tratamentos citados, deve-se destiná-los corretamente, observando as características e especificidades de cada material para que não causem danos ambientais.

Em todo o Brasil, são coletadas cerca de 68 milhões de toneladas de RCD por ano, o que representa uma média de 5,7 milhões t/mês ou 189 mil t/dia (CARNEIRO et al., 2001).

Dados coletados com a parceria da LIMPURB indicam que a maior parte dos resíduos sólidos de Salvador é composta por concreto e argamassa (53%), material cerâmico (14%), solos e areia (22%), rocha (5%) e plástico (4%) (CARNEIRO et al., 2001).

Em Salvador, segundo CARNEIRO et al. (2001), em torno de 2% do volume de RCD constitui-se de materiais como gesso, asfalto, vidro, metais ferrosos, espuma, couro, tecido e madeira. Esta estimativa pode não considerar o volume de Resíduo de Gesso (RG) que segue aderido (revestimento) ou misturado (pó) aos RCD classe A.

O resíduo de gesso, além dos impactos comuns aos resíduos sólidos de uma forma geral, quando disposto em aterro sanitário ou lixões, pode aumentar a formação de gás sulfídrico (H_2S) que é tóxico, inflamável e possui forte odor. Por esse motivo o RG não deve ser descartado em aterros, exceto quando o mesmo estiver encapsulado (JOHN e CINCOTTO, 2003).

A preocupação com a geração de RG aponta para a necessidade de soluções que possibilitem a sua reutilização ou reciclagem do RG, porém às características do RG e do próprio gesso restringem as alternativas. O RG não pode ser utilizado diretamente como agregado para concreto porque além de solúvel e lixiviável possui contaminantes como pregos, arames, fibras vegetais dentre outros e também porque o sulfato, de constituição do gesso, pode reagir com os aluminatos do cimento causando efeitos deletérios no concreto. Como agregado para pavimentação em aterros, o RG não pode ser utilizado por ser solúvel e lixiviável pela água o que ocasionaria, a longo prazo, a formação de vazios no aterro (JOHN e CINCOTTO, 2003).

Alternativas para reciclagem do RG têm sido estudadas, a exemplo da utilização na produção de cimento, correção de solos, aditivo para compostagem, forração de animais, absorvente de óleos, controle de odores em estábulos, secagem de lodo em esgotos, dentre outros (JOHN e CINCOTTO, 2003). Porém ainda não há uma solução viável técnica e economicamente para a utilização do RG.

Este trabalho pretende portanto, avaliar a influência do resíduo de gesso na composição da massa cerâmica para fabricação de blocos e telhas, contribuindo assim na busca por alternativas para utilização do RG.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a intensa industrialização, advento de novas tecnologias, crescimento populacional, aumento de pessoas em centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos, com um gerenciamento oneroso e complexo, considerando-se volume e massa acumulados, principalmente após 1980 (JOHN, 2000).

Segundo este autor, os problemas se caracterizavam por escassez de área de deposição de resíduos causada pela ocupação e valorização de áreas urbanas, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e de contaminação ambiental. Dentre estes resíduos estão os resíduos de construção e demolição (RCD) que estima-se variar entre 54% e 70% do volume de resíduos sólidos urbanos (PINTO apud CARNEIRO et al., 2001).

Na composição do RCD pode-se verificar a presença de uma maior fração de partículas inertes (fragmentos de concreto, argamassa, cerâmica e rocha) e menor fração de partículas não-inertes, como tintas, solventes e gesso. Segundo a Resolução 307 do CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente, os resíduos de RCD inertes são classificados como A, enquanto que os resíduos de RCD não-inertes são resíduos classificados como B, C ou D.

Algumas cidades decidiram investir no RCD por meio da instalação de usinas de reciclagem e beneficiamento de RCD para uso como agregados na produção de concretos, como, Belo Horizonte (MG), Socorro (SP), Macaé (RJ), São Paulo (SP), Piracicaba (SP), Ciríaco (RS), Ribeirão Preto (SP) e Londrina (PR) (atualmente desativada) (PASQUALOTTO FILHO et al., 2007). Entretanto, estas usinas só beneficiam a parte inerte (Classe A) dos RCD, que são compostos basicamente de resíduos de argamassa, concreto e materiais cerâmicos (CARNEIRO et al., 2001). Segundo os autores, os RCD não inertes como papel e papelão, plástico, metais e madeira, classificados como B, são encaminhados para reciclagem.

Os resíduos de classe C (gesso) e de classe D (tintas, solventes e outros) ainda não possuem forma adequada ou viável economicamente de reutilização, reciclagem ou destinação (CONAMA, 2002).

Além da Resolução 307 do CONAMA, a norma NBR 10004 (2004) – Resíduos Sólidos – Classificação, classifica o gesso como resíduo não inerte, e que, deste modo, não pode ser simplesmente depositado nos aterros de construção.

O gesso natural é composto basicamente por gipsita, que tem sua fórmula química dada por $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de cálcio dihidratado), anidrita e impurezas, como argilominerais, calcita, dolomita e material orgânico (JOHN, 2000).

O gesso na construção civil tem muitas aplicações, a saber: revestimentos, divisórias, forros e elementos decorativos. Este uso crescente tem aumentado a geração de resíduos deste material. Segundo JOHN (2000), a gestão do resíduo de gesso (RG) deve ser orientada de forma que o mesmo fique encapsulado para evitar reações ou combinações com outros resíduos ou bactérias.

O resíduo de gesso é considerado contaminante, não podendo assim ser beneficiado para produção de agregados para concreto, dentre outros motivos porque há reação entre os aluminatos do cimento (C_3A e C_4AF) e o sulfato do gesso (SO_4^{2-}) que em presença de umidade pode gerar etringita. Este composto ocupa volume muito maior do que os reagentes originais, criando tensões expansivas e assim ocasionando a desagregação das peças de concreto. O sulfato da composição do gesso pode causar reações expansivas e, conseqüente, deterioração do concreto (JOHN, 2000).

Estudos de CARNEIRO et al. (2001) apontaram que o RG junto com outros resíduos como asfalto, vidro, metais ferrosos, espuma, couro, tecido e madeira correspondem a apenas 2% do RCD. Porém com base nas diversas formas de utilização do gesso na construção civil, espera-se que o volume de RG gerado seja bem maior, sendo necessário estudos mais específicos para determinação deste volume.

As determinações legais, aliadas aos impactos ambientais (demanda por aterros, contaminação de lençóis freáticos, rios, córregos, solo, produção de lixiviados metálicos e gás sulfídrico, dentre outros) causados por disposição inadequada de resíduos sólidos, justificam a busca de alternativas para aplicação do resíduo de gesso (RG), uma vez que poderá trazer vantagens tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.

Quanto ao fator econômico a redução de resíduos pode ser determinante para a sobrevivência de empresas em mercados cada vez mais competitivos. No que se refere ao fator ambiental esta redução pode minimizar a demanda por recursos naturais, além da redução de entulho, cujas áreas de disposição estão cada vez mais escassas, principalmente nos grandes centros urbanos (Paliari et al. apud CARNEIRO et al., 2001)

Como exemplo de soluções propostas para destinação adequada dos resíduos de gesso (RG), tem-se a experiência de fabricantes de gesso, que recolhem os RG de algumas empresas geradoras e levam para suas fábricas para reprocessamento. Entretanto, alternativas que atendam a legislação vigente, que sejam tecnicamente viáveis e que tenham abrangência nacional, ainda não foram criadas. Atualmente nas grandes cidades brasileiras os resíduos de gesso da construção civil são depositados em aterros, sem o devido controle, juntamente com os demais resíduos de construção civil (CARNEIRO et al., 2001).

Dentre estas alternativas encontra-se a incorporação dos resíduos não-inertes, particularmente o gesso, na produção de cerâmica vermelha. A indústria de cerâmica vermelha figura como alternativa, pois com a sinterização os constituintes da massa cerâmica ficam encapsulados e por isso, em alguns casos, tornam-se inertes quando queimados em altas temperaturas (CALLISTER JR, 2002).

Além disso, o setor de cerâmica vermelha no Brasil é um grande absorvedor de matéria-prima, contando com cerca de 11.000 empresas, com faturamento da ordem de R\$ 2,8 bilhões, que são em sua maioria de micro ou pequeno porte (MOTTA et al., 2001), produzindo cerca de 65 milhões de toneladas por ano, consumindo grandes quantidades de argilas (Duailibi Filho, Carvalho apud NASCIMENTO, 2002). Segundo SICM (2005), a produção mensal é da ordem de 5,3 bilhões de peças, com consumo de argila superior a 10 milhões de toneladas por mês. Desse modo, essa indústria tem a possibilidade de absorver grande quantidade de RG. Entretanto, devido às propriedades físico-químicas do resíduo de gesso e das requeridas para os materiais cerâmicos, questiona-se, se isto é possível.

ANDRADE et al. (2006) estudaram compósitos cerâmicos com resíduo de gesso (RG) da indústria da Construção Civil avaliando a resistência à flexão, densidade aparente e absorção, concluindo que a adição de RG provocou perda de resistência e aumento da absorção, porém ainda manteve o produto dentro das especificações técnicas de fabricação.

ACCHAR (2006), MENEZES et al. (2002)a, MOREIRA et al. (2003), MOREIRA et al. (2005) e SABOYA JR et al. (2006), estudaram a incorporação de resíduos provenientes das indústrias de rochas ornamentais como granitos e mármore na massa cerâmica, avaliando as propriedades de tensão ou módulo de ruptura à flexão, retração linear antes e após queima, absorção, porosidade aparente e massa específica

aparente, considerando os resultados obtidos satisfatórios, indicando assim a indústria cerâmica como potencial absorvedora destes resíduos.

BALATON et al. (2002), MARTINS et al. (2005), NASCIMENTO (2002), OLIVEIRA et al. (2004), VIEIRA et al. (2004) estudaram o aproveitamento de resíduos de indústria de galvanoplastia, de papel e beneficiamento de minérios, química, siderúrgica e da própria indústria cerâmica, respectivamente. Todos os estudos apontaram a indústria cerâmica como potencial absorvedora destes resíduos.

VIEIRA et al. (2007a), SOUZA et al. (2008), VIEIRA et al. (2007c), PINHEIRO et al. (2008), CAMPELO et al. (2006) estudaram a utilização de laterita, rejeito de minério de ferro, lama de aciaria, resíduo da produção de papel e de cerâmicos queimados (“chamote”), respectivamente. Todos consideraram satisfatórios os resultados dos trabalhos que apontaram como viável a utilização dos resíduos em cerâmica vermelha.

CAMARGO et al. (2005) estudaram os efeitos da incorporação de metais tóxicos na massa cerâmica, devido a propriedade de encapsulamento que as cerâmicas apresentam. Em seu estudo os autores avaliaram as propriedades tensão de ruptura à flexão, massa específica aparente, variação linear dimensional, absorção de água, porosidade aparente e cor, concluindo que para teores de adição próximos de 10%, as propriedades avaliadas não são afetadas negativamente, a exceção da cor, para alguns metais.

MENEZES et al. (2002)b apresentou a possibilidade do uso de alguns rejeitos industriais como matéria-prima cerâmica, enfocando a indústria cerâmica como fonte economicamente viável e ecologicamente correta para reciclagem de resíduos. Os rejeitos foram divididos em três grupos: redutores de plasticidade, fundentes, que podem ser utilizados no processo de queima, e combustíveis.

Diante do exposto, fica evidente o potencial absorvedor da indústria cerâmica, para a possibilidade da incorporação do RG na massa da cerâmica vermelha, justificando assim este estudo.

Espera-se, com este trabalho, que a incorporação do resíduo de gesso em substituição parcial à argila da massa cerâmica possa promover um incremento no desempenho dos materiais cerâmicos, além de promover uma redução no impacto ambiental causado pela geração deste resíduo. A minimização dos impactos pode acontecer de diversas formas, como por exemplo, redução da demanda por aterros sanitários, controlados ou sem controle, diminuição da poluição nos aterros, uma vez

que o depósito de gesso em aterros pode provocar o aumento da produção de gás sulfídrico e lixiviados do sulfato, dentre outras formas (JOHN e CINCOTTO, 2003).

Além disso, o gesso pode representar uma redução no consumo de matéria-prima natural (argila) utilizada pela indústria cerâmica. Assim, este projeto visa discutir, avaliar e mostrar as possibilidades e vantagens na produção de cerâmica de baixo impacto ambiental, incorporando resíduo de gesso. Do ponto de vista da relevância econômica pode-se destacar diminuição dos custos de manufatura dos produtos cerâmicos. Poderá também haver redução dos custos de transporte para destinação adequada dos resíduos, diminuição do preço final dos produtos cerâmicos e das obras em geral.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a influência da incorporação de resíduo de gesso na massa de argila para produção de blocos e telhas cerâmicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- a) Identificar, através da literatura, o processo e produção e as características dos materiais cerâmicos;
- b) avaliar a influência do resíduo de gesso nas propriedades cerâmicas dos materiais, tais como: cor, retração linear de secagem, retração linear após queima, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente e módulo de resistência à flexão;
- c) avaliar a influência da temperatura nas propriedades cerâmicas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada da seguinte forma:

No 1º capítulo apresenta-se a justificativa e a relevância de se avaliar a influência do resíduo de gesso na composição da massa cerâmica para produção de blocos e telhas. O capítulo inclui ainda os objetivos da pesquisa e a estruturação do trabalho.

O 2º capítulo trata da conceituação e caracterização dos materiais cerâmicos de forma geral, e dentre estes, destaca os materiais de cerâmica vermelha.

Discute-se no capítulo 3, o gesso desde a sua fabricação até a formação do resíduo de gesso na construção civil.

No capítulo 4 aborda-se a incorporação de resíduos diversos nas massas para cerâmica vermelha.

No capítulo 5 apresenta-se o programa experimental destacando-se os materiais que serão utilizados e o método de pesquisa.

A apresentação e discussão dos resultados serão mostradas no capítulo 6.

Por fim serão apresentadas no capítulo 7, as conclusões obtidas na pesquisa e sugestões para novos estudos.

2 MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos são compostos entre os elementos metais e não metais da Tabela Periódica. Eles são frequentemente óxidos, nitretos e carbetos. Dentre a grande variedade de materiais que se enquadra nesta classificação inclui-se os materiais cerâmicos compostos por minerais argilosos, cimentos e vidro. Estes materiais são tipicamente isolantes térmicos e elétricos, são mais resistentes a altas temperaturas e a ambientes abrasivos do que os metais e os polímeros. Com relação ao comportamento mecânico, eles são duros, porém quebradiços (CALLISTER JR, 2002).

O termo “cerâmica” vem da palavra grega *Keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”, indicando que as propriedades desejáveis desses materiais são normalmente atingidas após tratamento térmico.

A maioria dos materiais cerâmicos se enquadra em um esquema de aplicação-classificação que inclui os grupos: vidros, produtos estruturais à base de argila, louças brancas, refratários, abrasivos, cimentos e as mais recentemente desenvolvidas cerâmicas avançadas. As chamadas cerâmicas avançadas estão relacionadas à tecnologia de ponta, em particular pelas suas propriedades elétricas, magnéticas e óticas. Tem potencial ou são utilizadas em motores à combustão interna e de turbinas, chapas de blindagem, embalagens de componentes eletrônicos, ferramentas de corte e para conversão, armazenamento e geração de energia. A Figura 2.1 apresenta uma taxonomia dos vários tipos de materiais cerâmicos (CALLISTER JR, 2002).

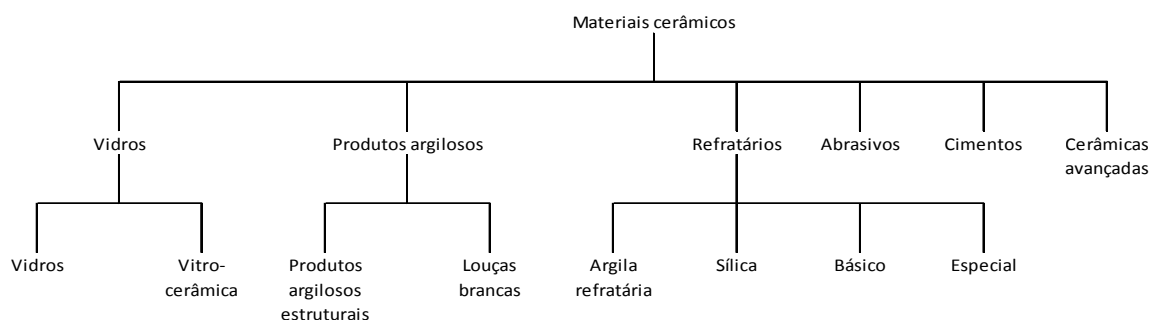


Figura 2.1 – Taxonomia dos tipos de materiais cerâmicos (CALLISTER JR, 2002)

O Quadro 2.1 apresenta os principais setores cerâmicos com as respectivas matérias-primas e características dos processos de produção.

Quadro 2.1 – Principais setores cerâmicos, matéria-prima e processo de fabricação (MOTTA, 2001)

CLASSIFICAÇÃO		PRODUTO	Matéria-prima										Processo de conformação			Temperatura de Queima (°C)											
Tipo de cerâmica*	GRUPO**/ SETOR		Plástica		Não-plástica								Moagem via úmida	Moagem via seca	Extrusão	Tornearia	Pressagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	>1.200			
		Argila comum	Argila plástica	Caulim	Feldspato (***)	Filito	Talco	Celca 1º	Quartzo	Outros																	
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica Vermelha	Blocos, lajes	P											P												
		Telha	P				O								P	P											
		Agregado leve	P										O		P												
	2	Cerâmica Branca	Grés sanitário		F	S	P	O		S	O	P															
			Porcelana Mesa		P	F					P	P	S	S	O												
		Porcelana Eletr.		P	F					P	P	S	S	O													
		Faiança		P	O	S	S	S	P	S	P																
	3	Revestimentos	Pisos rústicos	P	O									O		P											
			Pisos via seca	P												P											
			Azulejo		P	P			O	S	S	P					P										
Piso gresificado			O	P	S	S	P	O		S	P				O	P											
		Grés porcelânico		P	S	F		O		S	O	P			P												
Outras	4	Refratários			O						O	P															
	5	Isolantes				O					O	P															
	6	Especiais									O	P															
	7	Cimento	S						P	S	O	P															
	8	Vidro				S			S	P	P																
P	Processo ou composição principal (> 20%)		S	Processo ou composição secundária (< 10%)								O	Processo ou composição ocasional														

Obs.: *Classificação de Schuller & Henniche; ***O feldspato (ou concentrado de feldspato) é utilizado apenas nas porcelanas e eventualmente, no grés porcelânico, enquanto que nos demais produtos são utilizadas rochas feldspáticas.

Na construção civil os materiais cerâmicos mais utilizados são à base de argila e de cimento Portland. Como exemplo de materiais à base de argila tem-se: blocos, telhas, tubos, elementos vazados e de decoração, placas, dentre outros. À base de cimento tem-se: blocos, concreto, revestimentos, dentre outros.

Neste trabalho será dado destaque a indústria de cerâmica vermelha ou estrutural, que é uma particularidade dos materiais cerâmicos à base de argila, responsável principalmente pela produção de blocos e telhas para construção civil.

2.1 CERÂMICA VERMELHA

Indústria de cerâmica vermelha caracteriza-se por ser uma atividade com distribuição muito pulverizada no Brasil. São geralmente micro e pequenas empresas de

organização simples e familiar. Existiam no ano 2000 no Brasil, cerca de 11.000 unidades produtivas com quantidade de funcionários variando de 20 a 30, totalizando de 250.000 a 300.000 empregos (BUSTAMANTE, 2000).

Na Bahia, segundo SICM (2005), a produção de blocos cerâmicos representa 82% e a de telhas 13,8% do total produzido no estado. A Tabela 2.1 apresenta os produtos fabricados na Bahia por tipo e eixo de desenvolvimento.

Tabela 2.1 – Principais produtos por eixo de desenvolvimento na Bahia (SICM, 2005)

Eixo de Desenvolvimento	Produtos Fabricados (Mensal)								
	Blocos	Telhas				Bloco de Laje	Refratário	Outros	Total
		Colonial	Capa Canal	Plana	Marombada				
São Francisco	1.479.000	0	0	0	132.000	334.100	0	0	1.945.100
Chapada	6.739.000	0	0	0	72.000	256.000	0	0	7.067.000
Extremo Sul	3.998.000	400.000	0	0	0	296.000	10.000	0	4.704.000
Mata Atlântica	3.880.000	0	0	0	0	140.000	0	250.000 ²	4.270.000
Metropolitano	13.117.000	0	0	0	0	930.000	0	50.000	14.097.000
Grande Recôncavo	9.702.000	590.000	850.000	0	240.000	100.000	0	0	11.482.000
Planalto	8.130.000	980.000	0	30.000	4.924.000	295.000	0	52.000	14.411.000
Nordeste	1.980.000	0	0	0	35.000	0	0	0	2.015.000
Total	49.025.000	1.970.000	850.000	30.000	5.403.000	2.351.100	10.000	352.000	59.991.100

O setor de cerâmica afeta as linhas de transporte e o meio ambiente devido ao movimento de aproximadamente 60.000.000 de toneladas em matéria-prima. Quanto ao envio de produtos, o raio médio de ação dessas empresas é de até 250 km, podendo chegar a 700 km para telhas, pois a partir destas distâncias o transporte fica inviável (BUSTAMANTE, 2000). Ainda segundo este autor, a renda do setor de cerâmica vermelha, que é de aproximadamente US\$ 2.500.000.000, fica nos locais de produção tendo um alto significado social na criação de empregos e construção de moradias.

A Tabela 2.2 mostra os principais seguimentos de cerâmica no Brasil com sua produção anual, sendo o seguimento de cerâmica vermelha o que mais se destaca.

Tabela 2.2 – Seguimentos cerâmicos e produção anual (BUSTAMANTE, 2000)

Segmento	Valor da Produção (1.000 US\$ / Ano)
Cerâmica Estrutural (Vermelha)	2.500.000
Revestimentos (pisos e azulejos)	1.700.000
Matérias Primas Naturais	750.000
Refratários	380.000
Cerâmica Técnica, Especiais, outras	300.000
Sanitários	200.000
Louça de Mesa e Adorno	148.000
Fritas, Vidrados e Corantes	140.000
Matérias Primas Sintéticas	70.000
Cerâmica Elétrica	60.000
Equipamentos para Cerâmica	25.000
Abrasivos	20.000
Total do Setor	6.293.000

Segundo SICM (2005), em seu diagnóstico do setor de cerâmica vermelha na Bahia, existem no estado 239 empresas de cerâmica vermelha. Destas, aproximadamente, segundo o critério de faturamento anual, 0,57% são de médio porte, 23,3% são de pequeno porte e 76,13% são de microempresas. A Figura 2.2 apresenta a quantidade de Cerâmicas por cidade distribuídas no estado da Bahia.

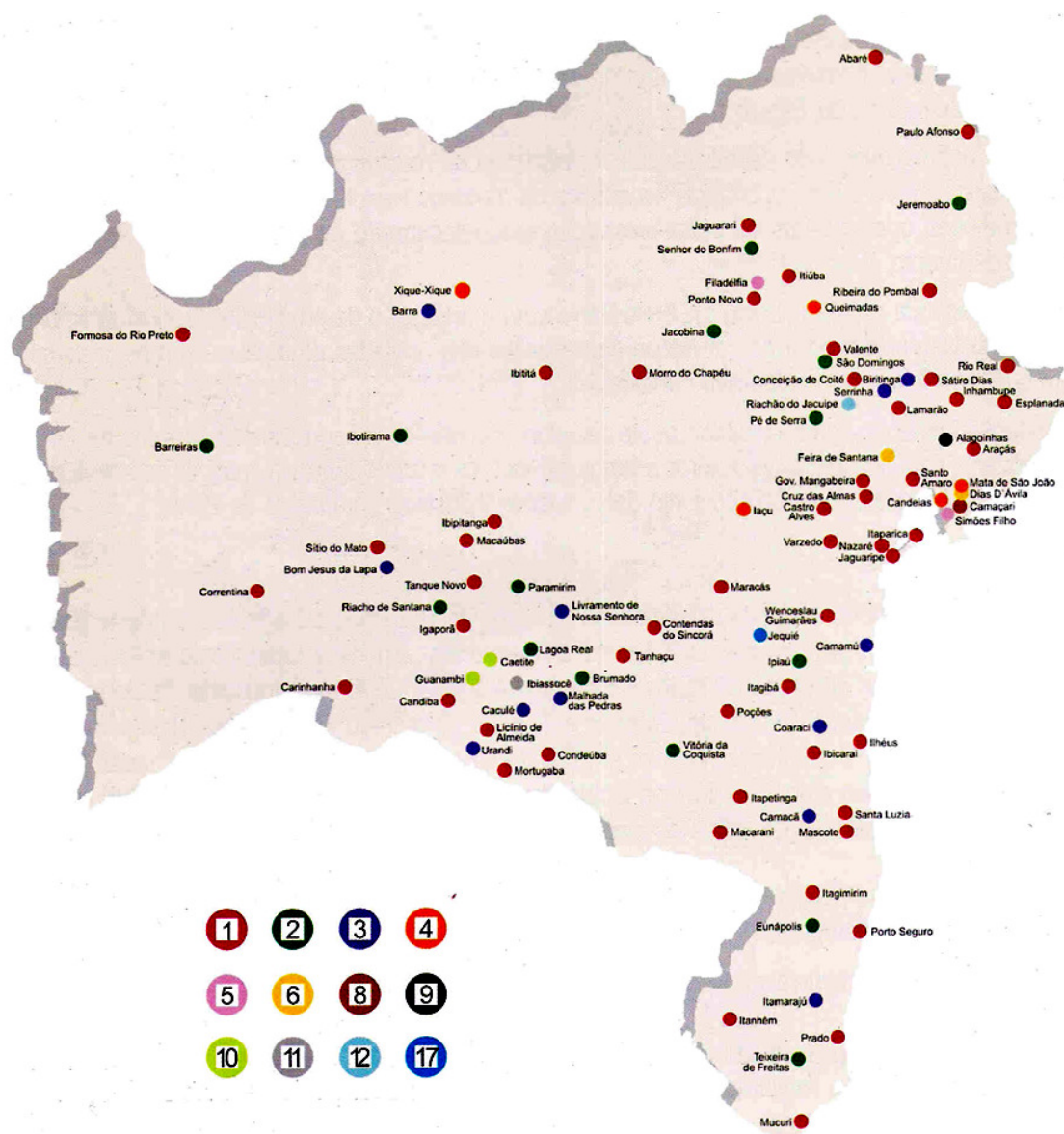


Figura 2.2 – Quantidade de Cerâmicas por cidade na Bahia (SICM, 2005)

SICM (2005), apresentou uma divisão com as principais regiões do estado da Bahia com base em características como potencialidade de reservas e diversidade de materiais argilosos, infra-estrutura física e proximidade com mercados consumidores, e expansão de cerâmica vermelha. Estas regiões são: 1) Grande Recôncavo e Região Metropolitana de Salvador (RMS), 2) Sul da Bahia e 3) Caetitê / Ibiassucê. A Figura 2.3 apresenta a região do Grande Recôncavo e Região Metropolitana de Salvador (RMS) com destaque para o Pólo de Alagoinhas / Entre Rios / Inhambupe, pois as argilas utilizadas nesta dissertação foram extraídas desse Pólo.

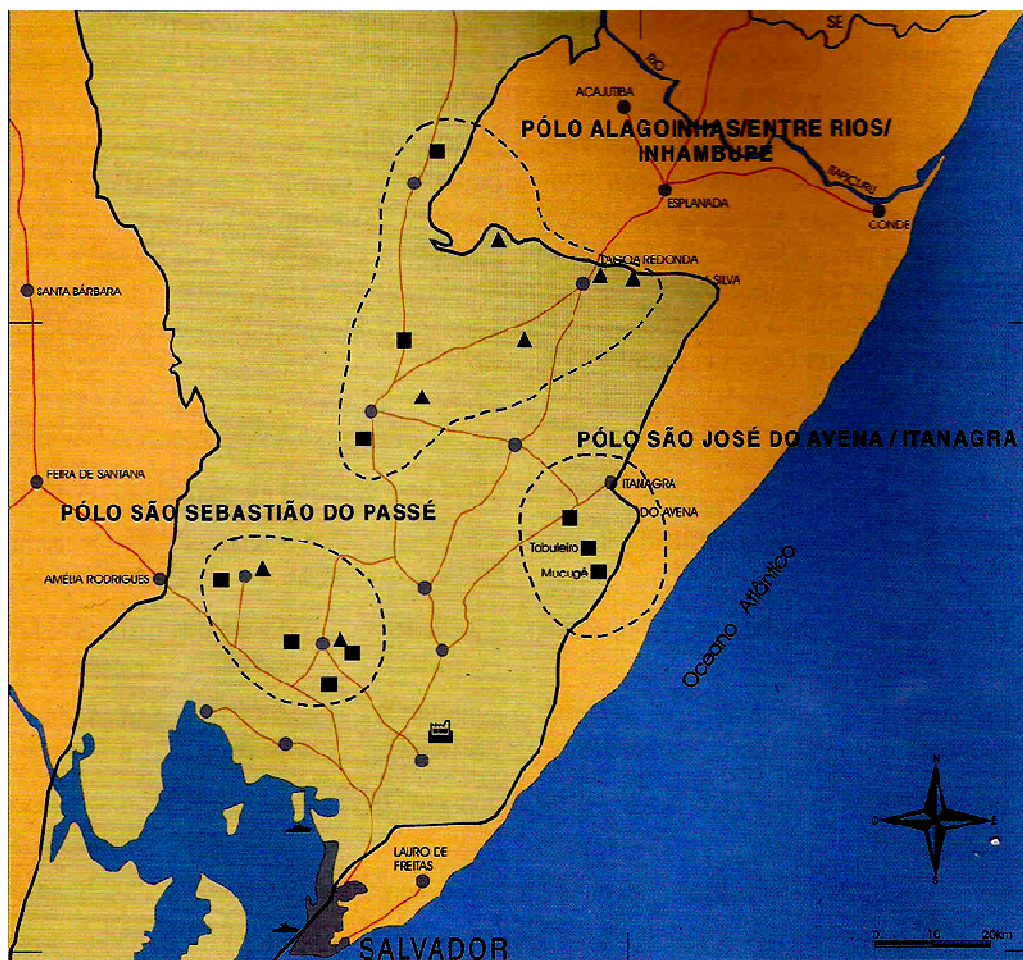


FIGURA 1

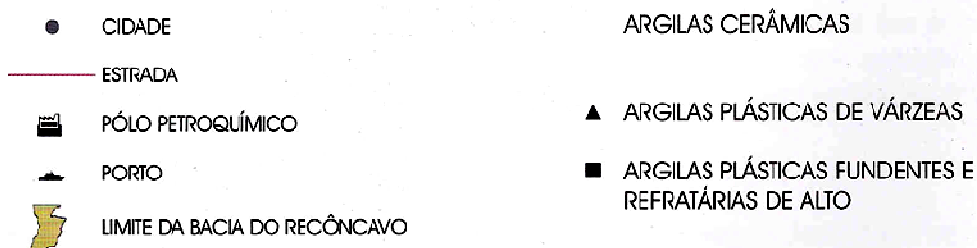


Figura 2.3 – Principais Pólos Mínero-Cerâmicos Potenciais da Região do Grande Recôncavo (SICM, 2005)

2.1.1 Matéria-Prima

A indústria cerâmica tem como matéria-prima principal a argila que é formada por um agregado de argilominerais e outros materiais como quartzo, mica, carbonatos, matéria orgânica, óxidos, hidróxidos e silicatos (NASCIMENTO, 2002).

Os principais produtos deste seguimento são: tijolos, blocos, telhas, tubos, lajotas, vasos ornamentais, agregados leve de argila expandida e outros. É a coloração avermelhada destes produtos – devido a presença de óxidos de ferro em teores que podem superar 4% – que caracterizam o seguimento como sendo de indústria de cerâmica vermelha (MOTTA, 2001).

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade. Quimicamente são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio (SANTOS, 1989).

As argilas têm grande importância em prospecções geológicas, agricultura, mecânica dos solos e em grande número de indústrias, como metalúrgica, de petróleo, de borrachas, de papel e de cerâmica.

Uma argila pode ser composta por um argilomineral ou por uma mistura de diversos argilominerais, além de ter em alguns casos matéria orgânica, sais solúveis, quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais (SANTOS, 1989). Isto justifica a diversidade de tipos de argilas que são encontradas na natureza.

Para MOTTA (2004), dos argilominerais, os mais comuns são formados por folhas tetraédricas (T) de silício e octaédricas (O) de alumínio, e com menor frequência de magnésio e/ou ferro. São unidades estruturadas com proporções de 1:1 (TO) ou 2:1 (TOT). Outro aspecto responsável pela tipificação dos argilominerais em diversos agrupamentos é o espaçamento basal¹ dessas unidades, destacando-se os grupos da caulinita, illita e esmectita como os mais importantes do ponto de vista cerâmico.

Os grupos de argila diferenciam-se também por sua estrutura cristalina. A Figura 2.4 apresenta a representação esquemática da estrutura cristalina dos principais argilominerais.

¹ Espaçamento basal – espaçamento entre as superfícies superiores de duas camadas lamelares ou folhas de um argilomineral (SANTOS, 1989)

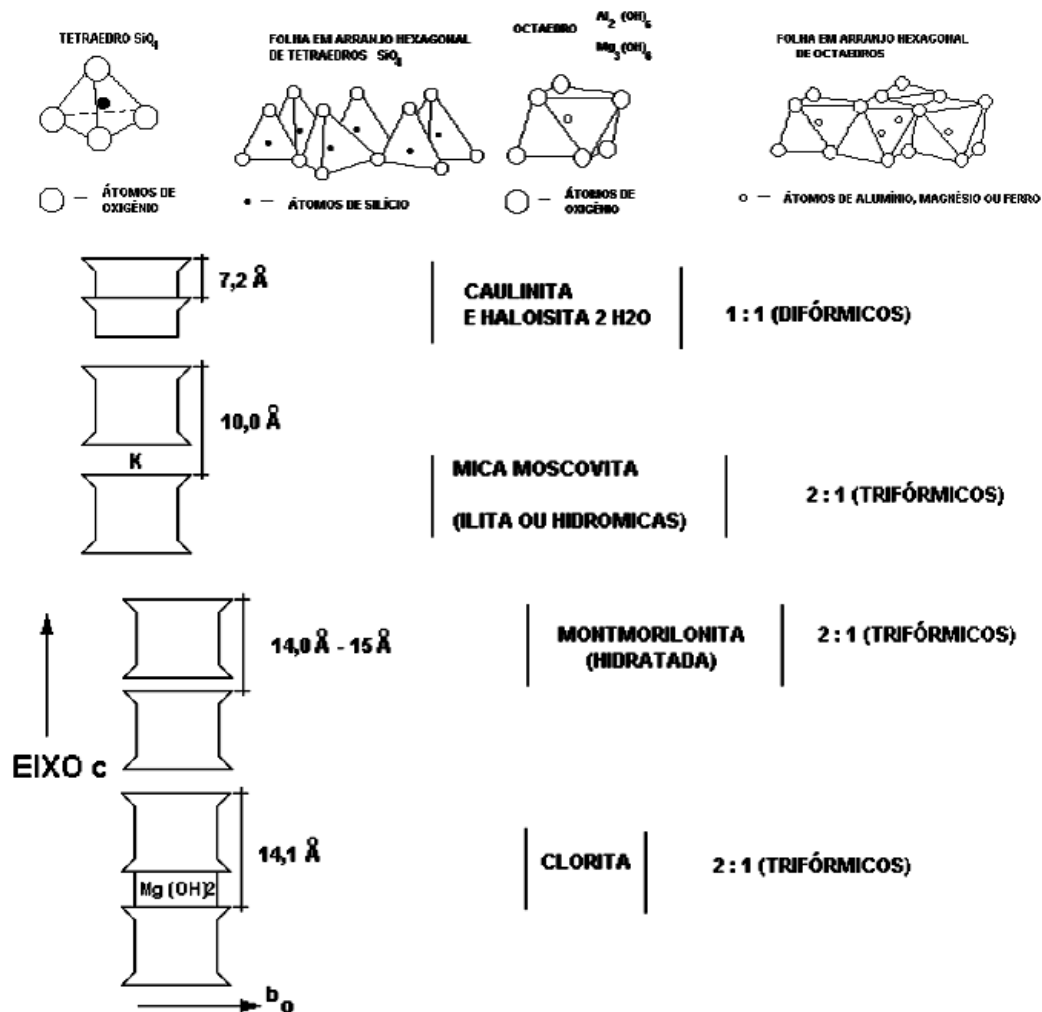


Figura 2.4 – Representação esquemática da estrutura cristalina dos principais argilominerais (SANTOS, 1989)

NORTON (1973) agrupou as argilas de acordo com os argilominerais presentes em: grupo da caulinita – composto por caulinita, diquita, nacrita, haloisita e aofânio; grupo da montmorilonita – composto por montmorilonita, beidelita, nontronita, hectorita, saponita, sauconita, vulconsoíta e pimelita; minerais micáceos – composto por ilita, moscovita, flogobita, biotita, lepdolita e margarita; minerais de alumínio hidratados – composto por – gibsita e diásporo.

Devido a argila ser um material muito fino e muitas vezes de mineralogia mista, torna-se difícil a identificação e classificação precisa, propiciando uma difusão de terminologias (MOTTA, 2004). O Quadro 2.2 apresenta algumas dessas nomenclaturas com critérios técnicos e jargão cerâmico.

Quadro 2.2 – Nomenclaturas, critérios técnicos e jargão cerâmico (MOTTA, 2004)

Critérios de Classificação	Exemplos de Terminologias Usuais
Aplicação	Argilas comuns ou para cerâmica vermelha; argilas plásticas para cerâmica branca; caulim; argila refratária; bentonitas; argilas descorantes.
Composição mineralógica	Argilas cauliniticas; caulim; esmectita e argilas esmectíticas; illita e argilas illíticas; gibbsita e argilas gibbsíticas; argilas calcíticas; de composição mista.
Litologia	Folhelho; argilito; siltito; ritmito; varvito; argila turfosa; argila calcárea.
Cor de queima	Argila de queima vermelha; argila de queima branca, de queima clara etc.
Composição química	Argilas alcalinas; argilas ferruginosas; argilas carbonáticas, argilas aluminosas.
Temperatura de sinterização e refratariedade	Argilas fundentes e argilas refratárias
Origem geológica (alteração-transporte)	Argilas sedimentares; argilas de alteração ou alteritas; argilas residuais ou primárias; argilas transportadas ou secundárias; argila coluvial.
Origem geológica (ambiente deposicional)	Argilas marinhas; de várzea; de planície costeira, lacustre; deltaica; de estuário; glacial.
Cronológico (idade)	Argilas quaternárias, argilas terciárias, argilas fanerozóicas, gondwânicas.
Contexto geomorfológico –geológico	Argila de baixo ou baixio, argila de várzea, argila de planície, argila de alto, argila de bacia sedimentar, argila formacional, argila de barranco, de morro.
Plasticidade	Argila plástica; argila semi-plástica; argila gorda; argila magra
Granulometria	Argila, argila siltica; argila arenosa
Denominações locais	Taguá (taguá mole, taguá duro); tabatinga; torba
Terminologias internacionais	Ball clay; underclay; fuller clay, flint clay etc.

As argilas para terem emprego na fabricação de tijolos e blocos devem oferecer condições favoráveis de moldagem; um valor de médio a elevado de módulo de resistência à flexão, antes e após a queima; é desejável apresentar cor avermelhada após a queima em temperaturas razoavelmente baixas (950°C – temperatura usual de queima para essa aplicação), com o mínimo de trincas e empenamentos. Estas argilas são geralmente de origem sedimentar recente, a exemplo das ilitas e caulinitas. Se na sua composição apresentarem teores elevados de ferro divalente², elementos alcalinos e alcalinos-terrosos, podem ser prejudiciais por causar retração excessiva, redução da faixa de vitrificação e colorações indesejáveis (SANTOS, 1989).

Segundo MOTTA (2004), as argilas para fabricação de cerâmica vermelha podem ser agrupadas em dois ambientes geológicos com ampla distribuição no Brasil:

a) argilas quaternárias - podem ser de várzea que é o ambiente mais acumulador de argila nas regiões interiores ou de planície costeira, encontrada junto a regiões litorâneas. Estas argilas foram formadas no período quaternário de clima quente e úmido em locais de alagamento. As principais características são alta umidade e plasticidade, propiciando adequada trabalhabilidade para os processos cerâmicos de conformação plástica como produtos extrudados por exemplo;

b) argilas de bacias sedimentares - como o nome sugere, é típica de bacias sedimentares. No Brasil estas bacias foram formadas na era paleozóica e mesozóica. Estas argilas têm predominantemente argilominerais com estrutura do tipo 2:1 (TOT),

² Ferro divalente é o íon do ferro representado por Fe²⁺ (MOTA, 2004)

chamadas no jargão cerâmico principalmente de Taguá. Caracterizam-se pela presença de alto conteúdo de material ferruginoso e ilita, que sendo rico em óxido de potássio, confere baixo ponto de sinterização. As jazidas se apresentam em pacotes argilosos contínuos e com relativa homogeneidade.

A Figura 2.5 apresenta as principais bacias sedimentares do Brasil portadoras de sedimentação argilosa, com potencial para produção de cerâmica vermelha e revestimentos via seca.



Figura 2.5 – Principais bacias sedimentares brasileiras de argila (MOTTA, 2004)

2.1.2 Processos Produtivos

Segundo NASCIMENTO (2002), o processo produtivo da indústria de cerâmica vermelha pode ser dividido resumidamente nas seguintes fases: a) mineração, transporte e estocagem no pátio; b) processo fabril, no qual a massa é trabalhada, mas não é transformada, compreendendo as ações de alimentação das máquinas, preparação granulométrica, umidificação, moldagem das peças (blocos, telhas e outros.) e inspeção; e c) transformação da matéria-prima que compreende as atividades de secagem, queima e estocagem, intercaladas por inspeção e transporte. A Figura 2.6 apresenta o fluxograma das atividades de uma indústria de cerâmica vermelha.

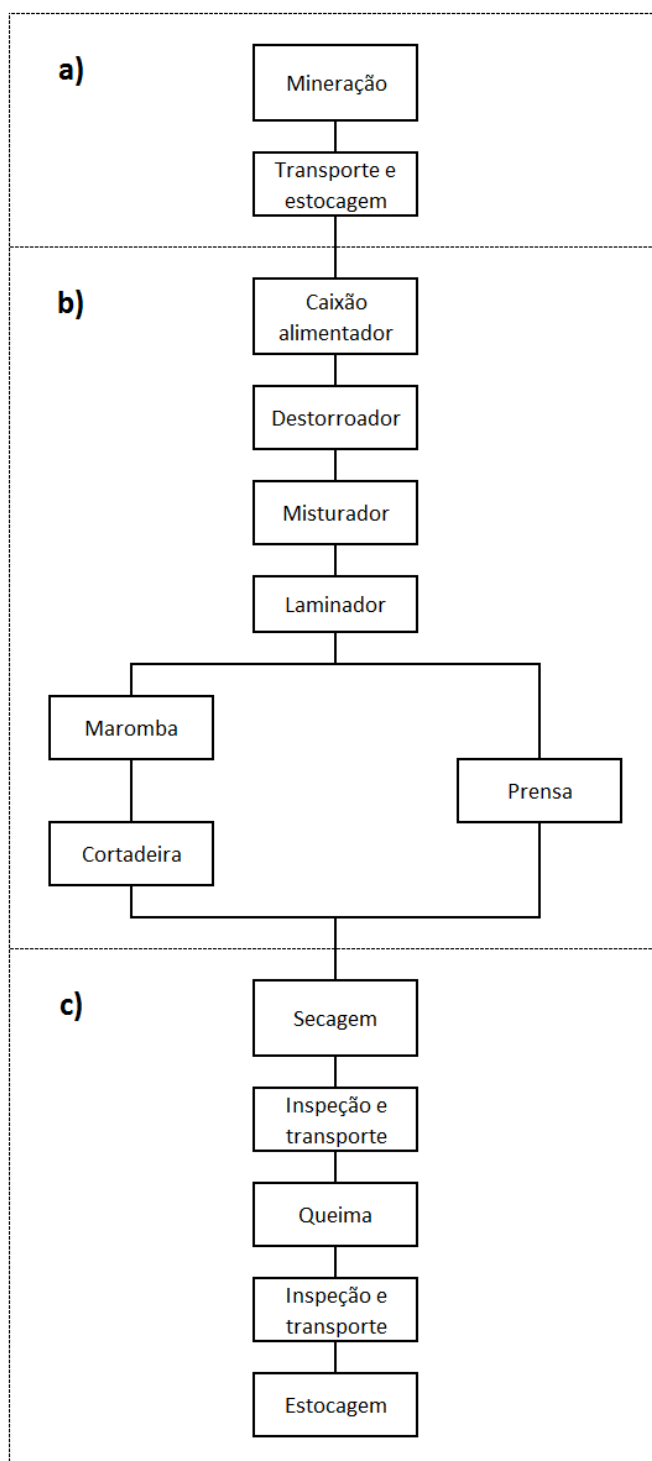


Figura 2.6 – Fluxograma das atividades na indústria de cerâmica vermelha

a) Mineração, transporte e estocagem

Devido a limitações econômicas, as indústrias de cerâmica vermelha geralmente são montadas em torno de suas jazidas. A mineração é feita a céu aberto, utilizando tratores para retirada de qualquer capeamento impróprio ao uso na cerâmica

para fora da área da jazida. Os tratores escavam o material selecionado para produção e empilham de forma que possa ser apanhado por pás carregadeiras e colocado em caminhões basculantes para transporte e estocagem. Existem jazidas em que praticamente não ocorre material de decapagem, outras que o minério não é uniforme, necessitando que se façam correções na mistura e outras ainda que há bolsões de material imprestável para este fim. Assim deve-se ter cuidado com a jazida e, portanto, o plano de lavra deve ser executado após conhecimento da fazenda da jazida, com o intuito de evitar improvisações que acarretem em maiores custos e perda da qualidade da matéria-prima (NASCIMENTO, 2002).

b) Processo fabril

O processo fabril acontece com o uso de vários equipamentos. A matéria-prima é trabalhada, mas não é transformada termicamente (sinterizada).

A matéria-prima que vem do pátio de estocagem é colocada no caixão alimentador. Este local pode receber umidade num processo de cura chamado sazonalidade, que é a exposição às condições ambiente, sendo responsável por uma distribuição mais uniforme da água ao redor das micropartículas argilosas. Esse caixão é destinado à estocagem intermediária e uniformiza o fluxo de material que abastece as unidades seguintes da linha de produção. Ele é constituído geralmente por uma caixa com abertura inferior, por onde, através de um mecanismo de esteiras de velocidade controlada, desloca a argila do caixão para a linha de processo (NASCIMENTO, 2002).

No destorroador, os torrões grandes de argila, são triturados ou desintegrados até reduzi-los ao tamanho máximo de 20mm. É constituído basicamente de dois cilindros, um liso de grande diâmetro que gira a baixa velocidade e um com diâmetro menor provido de facas ou dentes que giram em alta velocidade (NASCIMENTO, 2002).

O misturador tem a função de misturar, homogeneizar e umidificar a argila. É constituído de uma carcaça cilíndrica de ferro, dotada de dois eixos rotativos horizontais providos de facas que ao girarem efetuam a mistura da argila, ao mesmo tempo em que deslocam a massa cerâmica para alimentação da linha de produção (Figura 2.7).

A etapa de umidificação é crítica, pois segundo CALLISTER JR (2002), quanto maior é o teor de água, mais intensa é a contração de volume, podendo gerar trincas ou fissuras. Portanto, o teor de água deve ser o menor possível.

No laminador a massa cerâmica, ou qualquer impureza que esta possa conter, é triturada ao máximo. Nesse equipamento, a massa cerâmica também tem promovida uma melhor distribuição da água de amassamento. Ele é composto por dois cilindros giratórios (NASCIMENTO, 2002).

A maromba é a máquina mais importante do sistema. Ela é responsável pela moldagem das peças. Este processo se dá pela extrusão ou prensagem, sendo o primeiro processo mais difundido. A maromba a vácuo produz a extrusão da massa cerâmica, após a extração de todo o ar possível existente na mesma. Isso se reflete em um produto de melhor qualidade devido a uma maior compactação e homogeneização da argila. Numa maromba a vácuo a argila é alimentada numa câmara umidificada; em seguida a argila é trabalhada e forçada em uma placa perfurada, através de um parafuso com rosca sem fim. Quando os pequenos filetes de massa passam pela placa perfurada são fragmentados por uma lâmina e então caem em uma câmara, na qual esta massa é mantida em vácuo de 26 polegadas de mercúrio (0,9 kgf/cm²). Nessa câmara, a massa de argila é trabalhada e consolidada em uma mistura homogênea, sem ar, e é extrusada por um parafuso, através do bocal onde o molde é colocado (NASCIMENTO, 2002).

A moldagem das peças só é possível, devido à propriedade das argilas, que quando misturadas com água em proporções corretas, tornam-se uma massa plástica e flexível muito suscetível a modelagem. Esta condição é conhecida como hidroplasticidade que é uma das razões para a ampla utilização dos materiais à base de argila. Porém, os minerais à base de argila, possuem limites de escoamento bastante baixos. Portanto a massa hidroplástica deve ter consistência suficiente para permitir que uma peça conformada mantenha sua forma durante o manuseio e a secagem (CALISTER JR, 2002).

Para verificação da quantidade de água que deve ser acrescentada à massa de argila para que a mesma alcance a plasticidade e consistência desejada, realizam-se os ensaios para obtenção dos limites de Atterberg que são: limite de liquidez e limite de plasticidade (NASCIMENTO, 2002).

As prensas também são utilizadas para moldagem só que por compressão. Este processo permite trabalhar matérias-primas pouco plásticas para aproveitamento de minerais imprestáveis para uso em marombas. Comumente as marombas são mais usadas para produção de tijolos furados e elementos vazados, dentre outros, enquanto as prensas são mais usadas para ladrilhos e telhas (NASCIMENTO, 2002).

A finalização desta fase acontece na cortadeira. Ela consiste de uma mesa de rolos em que é acoplado um dispositivo de corte quando a massa molhada atinge o limitador. Neste ponto do processo deve-se fazer a inspeção. Qualquer peça que é moldada com defeito deve ser recolhida e devolvida para o misturador ou encaminhada para a prensa de fabricação (NASCIMENTO, 2002).

c) Transformação da matéria-prima

A transformação da matéria-prima é constituída das etapas de secagem, queima e estocagem, intercaladas por inspeção e transporte. Comumente este transporte é feito em carros de mão ou sobre trilhos, principalmente quando a empresa possui estufa de secagem. As peças são postas para secagem em estufas ou ao ar livre (NASCIMENTO, 2002).

A secagem é um processo também considerado crítico, porque com a remoção da água, a separação interpartículas diminui e se manifesta em forma de contração de volume. Nas regiões internas de um corpo, a secagem é realizada através da difusão das moléculas de água até a superfície, onde ocorre a evaporação. Por conseguinte, a taxa de evaporação da superfície deve ser reduzida para, no máximo, a taxa de difusão da água. A superfície de uma peça cerâmica irá secar mais rapidamente que o seu interior, se a taxa de evaporação for maior do que a taxa de difusão. Isso poderá levar a ocorrência de defeitos como falhas ou trincas (CALLISTER JR, 2002).

Após a secagem, as peças são encaminhadas para a queima em fornos apropriados. Após a queima e a descarga do forno, é executada uma inspeção em que as peças defeituosas são descartadas e o produto final é encaminhado para armazenamento (NASCIMENTO, 2002).

A queima ou cozimento é o processo no qual ocorre a sinterização do material cerâmico. Neste processo, a densidade do material aumenta com uma conseqüente redução da porosidade e a resistência mecânica é melhorada. A temperatura de cozimento é dependente da composição e das propriedades desejadas para a peça acabada. Esta temperatura varia geralmente entre 900 e 1400 °C (CALLISTER JR, 2002).

Segundo CALLISTER JR (2002), quando materiais à base de argila são aquecidos a elevadas temperaturas, ocorrem algumas reações complexas como, por exemplo, a vitrificação. Esta reação, que vai ter como parâmetro o grau de vitrificação, depende da composição do corpo, do tempo e da temperatura de cozimento, e consiste

na formação gradual de um vidro líquido que flui para dentro do material preenchendo parte do volume de poros. A adição de fundentes como o feldspato, provoca a formação da fase líquida à temperaturas mais baixas. Ao redor das partículas não fundidas que permanecem no meio, esta fase fluida escoou preenchendo os poros como resultado da ação capilar, promovendo determinada contração de volume. Ao ser resfriada, a fase fundida forma uma matriz vítrea, tendo como resultado um corpo denso e resistente. Esta matriz tem como microestrutura final uma fase vitrificada, algumas partículas de quartzo (presente nas argilas) que não reagiram e alguma porosidade.

As propriedades dos materiais cerâmicos à temperatura ambiente são controladas pelo grau de vitrificação. Quanto maior o grau de vitrificação, a resistência, a durabilidade e a densidade são melhoradas (CALLISTER JR, 2002).

O processo de sinterização ou vitrificação ocorrido durante a queima está representado na Figura 2.7.

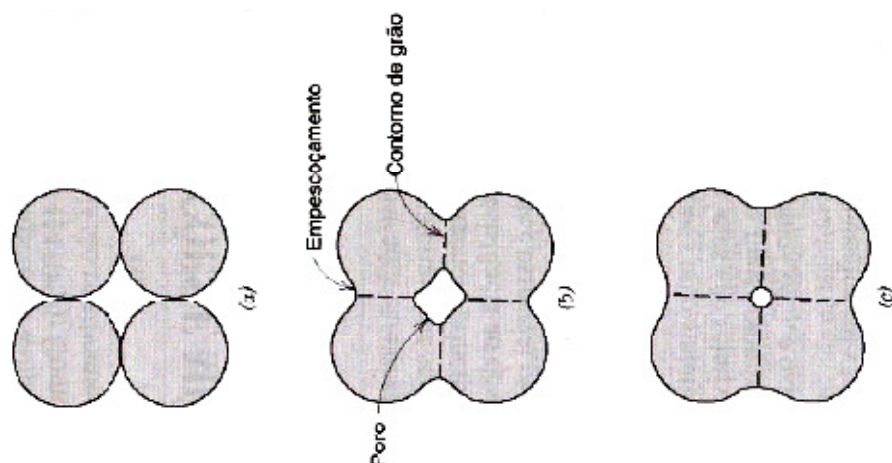


Figura 2.7 - Alterações estruturais que ocorrem no cozimento para um compactado de pós. (a) partícula de pós após prensagem; (b) Coalescência das partículas e formação de poros que ocorrem quando a sinterização tem início; (c) Com a progressão do processo de sinterização, os poros mudam de tamanho e forma (CALLISTER JR, 2002)

Os altos índices de perda na indústria de cerâmica vermelha são, segundo NASCIMENTO (2002), atribuídos aos seguintes fatores: falta de controle da matéria-prima quanto aos argilominerais constitutivos; falta de controle granulométrico em relação às percentagens de areia, silte e argila; ajuste de umidade relacionada com o tempo de cura; deficiência no estabelecimento da velocidade de queima dos produtos nos fornos.

A pesquisa realizada por SICM (2005), aponta como principais itens na composição dos custos finais do produto de CV na Bahia, por ordem de importância: mão de obra; lenha, serragem e óleo; energia elétrica; matéria-prima; impostos; diesel, gasolina e lubrificantes; e manutenção.

Apesar de muitas empresas cerâmicas, principalmente no Nordeste do Brasil, funcionarem de maneira artesanal ainda, há uma tendência de automação industrial fazer parte também da indústria cerâmica. Este avanço tecnológico poderá trazer ganhos de qualidade e de produtividade aos produtos cerâmicos.

A Tabela 2.3 apresenta os equipamentos utilizados, tempo médio de uso e manutenção, nas empresas de CV na Bahia, resultantes de pesquisa realizada por SICM (2005).

Tabela 2.3 – Equipamentos e quantidade de empresas por eixo de desenvolvimento na Bahia (SICM, 2005)

Eixo de Desenvolvimento	Equipamentos Utilizados no Processo								Tempo médio de uso em anos				Investimento (1999-2002)		Manutenção		
	Cx Alim		Desintegrador	Laminador	Misturador	Maromba		Corte		< 5	5 a 10	10 a 20	> 20	Sim	Não	Sim	Não
	Man	Mec				C/V	S/V	Man	Aut								
São Francisco	0	1	4	6	5	6	0	2	4	2	2	2	0	3	2	6	0
Chapada	0	5	5	24	10	23	1	8	16	17	4	4	3	11	14	25	2
Extremo Sul	3	4	5	12	9	12	0	4	8	1	2	8	0	7	5	12	0
Mata Atlântica	3	6	7	10	8	11	1	5	8	5	2	3	2	8	5	12	1
Metropolitano	0	16	15	17	17	17	0	0	16	4	5	12	2	9	13	22	1
Grande Recôncavo	0	11	12	20	17	17	3	3	17	9	9	6	4	14	13	20	0
Planalto	5	31	29	50	50	50	16	36	32	27	14	18	7	29	27	62	4
Nordeste	1	3	5	8	6	8	0	4	4	1	3	4	0	5	3	5	3
Total	12	77	82	147	122	144	21	62	105	66	41	57	18	86	82	164	11

C/V - com vácuo; S/V – sem vácuo

Em geral a manutenção considerada neste quadro consiste basicamente na limpeza e lubrificação das máquinas e substituição ou consertos de peças em oficinas da região. Porém, a manutenção periódica deve ser uma constante preocupação nas empresas, independentemente do nível tecnológico da fábrica (FORTES apud SICM, 2005).

2.1.3 Propriedades Cerâmicas

VAN VLACK (1973) conceituou as propriedades que são avaliadas nos materiais cerâmicos independente da finalidade do material. Estas propriedades podem ser: mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas e ópticas.

Neste trabalho serão analisadas principalmente as propriedades mecânicas à temperatura ambiente, devido a sua importância como limitador da aplicação dos materiais cerâmicos. Também, por ser a temperatura de uso dos materiais cerâmicos que serão analisados.

2.1.3.1 Propriedades Mecânicas

Os materiais cerâmicos quando submetidos a uma tensão de tração, sempre fraturam antes que ocorra qualquer deformação plástica. O comportamento frágil ou fragilidade consiste na formação e propagação de trincas, através da seção reta do material em uma direção perpendicular à carga aplicada. As trincas crescem através dos grãos ou ao longo dos planos cristalográficos específicos, amplificando as tensões quando associadas a defeitos. Não existe amplificação de tensões associada com qualquer defeito existente para tensões de compressão. Por isso a resistência à compressão é da ordem de 10 vezes a resistência à tração. As medidas de resistência à fratura podem ser influenciadas pelo tamanho ou volume da amostra. Quanto maior a amostra, maior será a probabilidade da existência de defeitos e menor será a resistência (CALLISTER JR, 2002). O comportamento frágil pode ser observado na Figura 2.8, que apresenta o comportamento tensão-deformação até a fratura para o óxido de alumínio e o vidro. Percebe-se neste gráfico que há a ruptura sem que haja deformação plástica.

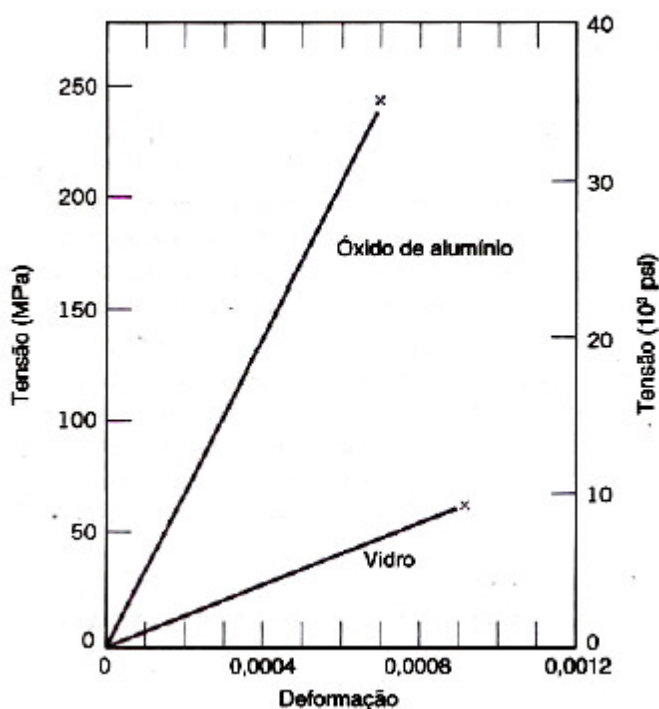


Figura 2.8 – Comportamento típico tensão-deformação para o óxido de alumínio e o vidro (CALLISTER JR, 2002)

Pode-se observar na Figura 2.8 que há uma relação linear entre a tensão-deformação para os dois materiais. Isto reflete o comportamento elástico dos materiais cerâmicos. O módulo de elasticidade segundo VAN VLACK (1973), é a medida da tensão necessária para produzir uma deformação unitária. Para CALLISTER JR (2002), os valores do módulo de elasticidade variam de 70 a 500 GPa, aproximadamente.

A Tabela 2.4 apresenta os valores característicos de resistência à flexão e módulo de elasticidade para alguns materiais cerâmicos usuais.

Tabela 2.4 – Resistência à flexão e módulo de elasticidade para dez materiais cerâmicos usuais (CALLISTER JR, 2002)

<i>Material</i>	<i>Resistência à Flexão</i>		<i>Módulo de Elasticidade</i>	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>
Nitreto de silício (Si ₃ N ₄)	250-1000	35-145	304	44
Zircônia* (ZrO ₂)	800-1500	115-215	205	30
Carbeto de silício (SiC)	100-820	15-120	345	50
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	275-700	40-100	393	57
Cerâmica-vítrea (Piroceram)	247	36	120	17
Mulita (3Al ₂ O ₃ -2SiO ₂)	185	27	145	21
Espinélio (MgAl ₂ O ₄)	110-245	16-35,5	260	38
Óxido de magnésio (MgO)	105 ^b	15 ^b	225	33
Sílica fundida (SiO ₂)	110	16	73	11
Vidro de cal de soda	69	10	69	10

^aParcialmente estabilizada com 3%mol Y₂O₃.

^bSinterizado e contendo aproximadamente 5% de porosidade.

A tensão de ruptura pode ser influenciada negativamente pela porosidade. Durante o processo de sinterização, como já foi visto, a maior parte da porosidade é eliminada. Porém, ainda permanece uma porosidade residual. Esta porosidade afeta tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência do material, de duas maneiras: uma é que os poros reduzem a área da seção de aplicação da carga e a outra é que os poros funcionam como concentradores de tensões. Uma porosidade de 10% do volume pode representar uma perda de 50% da resistência do material. A Figura 2.9 apresenta a influência da porosidade no módulo de elasticidade do óxido de alumínio.

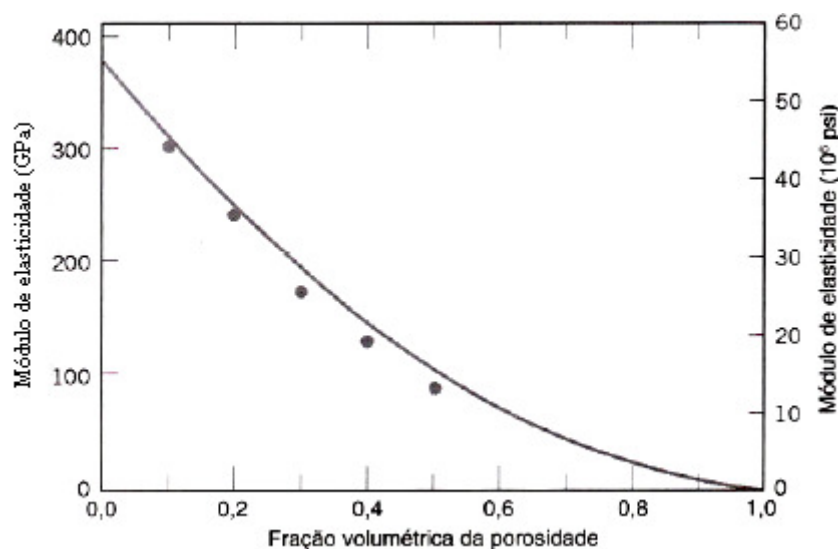


Figura 2.9 – Influência da porosidade sobre o módulo de elasticidade do óxido de alumínio (CALLISTER JR, 2002)

Outra propriedade importante é a dureza, que é geralmente indicada por uma das duas escalas. A escala de Mohs, representa a dureza dinâmica, ou dureza de corte, e ordena os materiais segundo resultados obtidos quando um material mais mole é riscado por outro mais duro. A escala Knoop baseia-se no grau de penetração de um material mole por um mais duro, portanto, é somente um teste estático. Esta escala é um pouco mais quantitativa que a primeira, pois apresenta números disponíveis para estabelecer a graduação de dureza para cerâmicos abrasivos. Uma vez que, a escala Mohs tem graduação que vai até nove e quase todos os materiais cerâmicos abrasivos são classificados, segundo esta escala de dureza nove, não permitindo assim uma graduação satisfatória. Para CALLISTER JR (2002) esta propriedade tem utilidade maior quando se exige dos materiais cerâmicos ações de abrasão ou esmerilhamento. Os materiais cerâmicos são os materiais mais duros dentre os conhecidos. Porém, só os que tem

dureza Knoop de aproximadamente 1000 ou superior são utilizados, em função de suas características abrasivas. A Tabela 2.5 apresenta a dureza Knoop de alguns materiais cerâmicos.

Tabela 2.5 – Durezas Knoop aproximadas (carga de 100g) para sete materiais cerâmicos (CALLISTER JR, 2002)

<i>Material</i>	<i>Dureza Knoop Aproximada</i>
Diamante (carbono)	7000
Carbeto de boro (B_2C)	2800
Carbeto de silício (SiC)	2500
Carbeto de tungstênio (WC)	2100
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	2100
Quartzo (SiO_2)	800
Vidro	550

2.1.3.2 Propriedades Térmicas, Elétricas e Magnéticas

Os materiais cerâmicos, a depender do processamento, podem ser condutores, semicondutores e isolantes térmicos, elétricos e magnéticos. Porém eles são considerados isolantes, porque a ligação química predominante dos materiais cerâmicos são ligações iônicas, que são ligações fortes e que não permitem elétrons livres (CALLISTER JR, 2002).

2.1.3.3 Propriedades Ópticas

As propriedades ópticas de refração, reflexão e luminescência dependem principalmente do método de processamento. Um exemplo típico é o óxido de alumínio que a depender do grau de vitrificação pode ser transparente (monocristalino), translúcido (policristalino muito denso) ou opaco (policristalino com porosidade) (CALLISTER JR, 2002).

3 GESSO

O gesso é originado da gipsita que são formadas através de depósitos evaporíticos naturais decorrentes de antigos oceanos, formados geologicamente por ocorrência de precipitação, seguida da evaporação e conseqüente concentração dos sais (JORGENSEN apud CANUT, 2006).

Segundo ANDRADE et al. (2006), as propriedades hidráulicas e as técnicas de calcinação do gesso já eram conhecidas pelos antigos povos egípcios, o que leva a crer, que este material já era utilizado por civilizações mais antigas.

O uso mais antigo do gesso em construção civil foi detectado nas pirâmides do Egito e, decorridos mais de 3500, tornou-se um dos mais importantes minerais para a manufatura dos materiais de construção (OLIVEIRA e RODRIGUES apud CANUT, 2006).

3.1 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO GESSO

Segundo ANTUNES (1999), o gesso pode ser agrupado em três tipos: o gesso natural, o gesso residual e o gesso para construção civil.

3.1.1 Gesso Natural

O gesso natural pode ser obtido por um processo dividido em quatro etapas, conforme apresentado a seguir:

a) Extração

A rocha sedimentar que dá origem ao gesso é o gipso. Em sua composição estão presentes basicamente gipsita, anidrita e impurezas, tais como argilominerais, calcita, dolomita e material orgânico. Desta composição a gipsita constitui a matéria

prima do gesso, sua fórmula química é dada por $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. A qualidade do gipso é avaliada pelo teor de gipsita que, por ser nacionalmente bastante pura, favorece a produção de gessos com alvura elevada (HINCAPIÉ et al. apud ANTUNES, 1999).

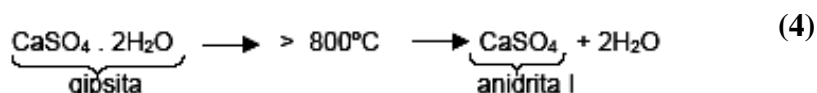
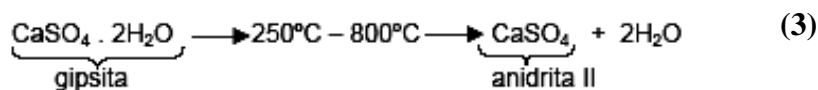
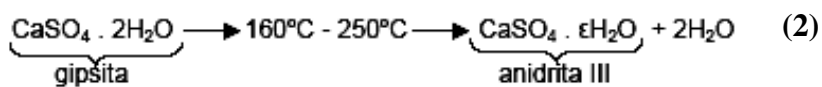
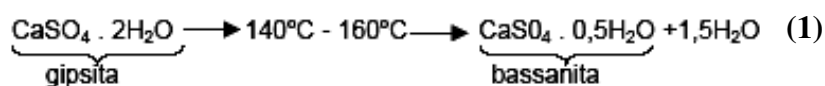
Na região do Araripe pernambucano, maior produtor de gesso do Brasil, as jazidas são exploradas pelo método de lavra a céu aberto, de maneira análoga à extração da argila (ANTUNES, 1999).

b) Preparação para calcinação

Antes de ser calcinada a gipsita passa por processos de beneficiamento para adequá-la ao forno de calcinação. Estes processos incluem britagem, moagem grossa, estocagem, secagem, moagem fina e silagem (ANTUNES, 1999).

c) Calcinação

Segundo ANTUNES (1999), a gipsita é calcinada a diferentes temperaturas e é basicamente a temperatura de calcinação que define suas propriedades, uma vez que a única mudança na composição química é a desidratação. Os produtos finais, obtidos a partir da calcinação, para cada faixa de temperatura de queima, estão representados nas Reações químicas de 1 a 4. De 120 a 180 °C é obtido o gesso estuque, de 150 a 700 °C pode-se obter o gesso de endurecimento lento, geralmente usado em revestimentos e entre 800 e 1000 °C pode-se obter o gesso de alta resistência, isto é, uma anidrita I.



Com as mudanças de fases, ocorridas durante a desidratação da gipsita, também são modificados os sistemas cristalinos, conforme pode ser verificado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento (CANUT, 2006)

Fórmula	Sistema cristalino	Mineral
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Monoclínico	Gipsita
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal	Hemidrato
$\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal	Anidrita III
CaSO_4	Ortorrômbica	Anidrita II
CaSO_4	Cúbica	Anidrita I

Em construções de edifícios em que os revestimentos precisam ser mais resistentes a fungos, geralmente utiliza-se o gesso anidro³ (anidrita I ou II) (CANUT, 2006).

d) Autoclavagem

A autoclavagem é também um processo térmico para tratamento da gipsita, que utiliza umidade e alta pressão com a utilização de equipamento chamado autoclave. Este processo é aplicado para obtenção do gesso α que é o gesso hospitalar (CANUT, 2006).

3.1.2 Gesso Residual

Gesso residual é o gesso obtido como subproduto durante a síntese ou neutralização de alguns ácidos. O gesso deste tipo mais produzido no mundo é o fosfogesso, que é um subproduto da produção do ácido fosfórico. Sua fórmula química é idêntica à do gesso, porém contém impurezas como íons de fósforo (ANTUNES, 1999). O Quadro 3.2 apresenta os sulfatos ou gessos residuais mais conhecidos.

³ Anidro – gesso que não possui moléculas de água em sua composição química

Quadro 3.2 – Origem e nomenclatura de sulfatos residuais (ANTUNES, 1999)

Origem		Nome Genérico
Produção de ácido fosfórico		Fosfogesso, fosfohemidrato, fosfoanidrita
Produção de ácido fluorídrico		Fluorogesso, fluoroanidrita
Produção de ácido bórico		Borogesso, borohemidrato
Produção de ácidos orgânicos(ácido cítrico, fórmico, tartárico)		Organogesso (citrogesso, formogesso, tartarogesso)
Extração de cloreto de sódio		Salgesso
Tratamento de resíduos industriais	neutralização de ácidos	Gesso de neutralização de resíduos ácidos ou wan gesso
	neutralização de efluentes líquidos da produção de dióxido de titânio	Titanogesso
	produção de soda	Sodogesso
	neutralização de gases de combustão contendo óxido de enxofre	Sulfitogesso

3.1.3 Gesso para Construção Civil

Segundo SEBRAE, 1996 apud CARVALHO (2005), da gipsita extraída no Brasil aproximadamente 67% é destinada à calcinação, 33% à indústria cimenteira e 1% para fins agrícolas. Do gesso obtido a partir da calcinação, cerca de 96% destina-se à construção civil, seja para fundição (61%) ou para revestimentos (35%). O restante da produção destina-se à fabricação de moldes para a indústria cerâmica e uso hospitalar.

Ainda segundo a autora, as propriedades como ausência de retração por secagem, resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico, propriedades mecânicas compatíveis com os esforços atuantes, alta produtividade devido ao rápido endurecimento, além das propriedades do ponto de vista da racionalização ou evolução de processos e técnicas construtivas de edifícios convencionais, são extremamente atraentes para sua utilização na construção civil,

O gesso pode ser utilizado para diversas finalidades. Para haver diferenciação entre o gesso utilizado na construção dos demais tipos de gesso, a norma nacional

denominou este como sendo gesso de construção e o definiu como: “Material moído em forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores de pega.” (NBR 13207, ABNT 1994). Esta norma divide o gesso de construção em dois tipos: gessos para fundição e gessos para revestimento, admitindo-se subdivisão de ambos apenas segundo o critério de finura e tempo de pega.

RIBEIRO (2006), levantou junto ao Sindusgesso os principais usos do gesso na construção civil, percebe-se que a maior parte é utilizado em pré-fabricados seguido de gesso para revestimento. A Figura 3.1 apresenta as formas de utilização com base na produção anual do Pólo Gesseiro do Araripe.

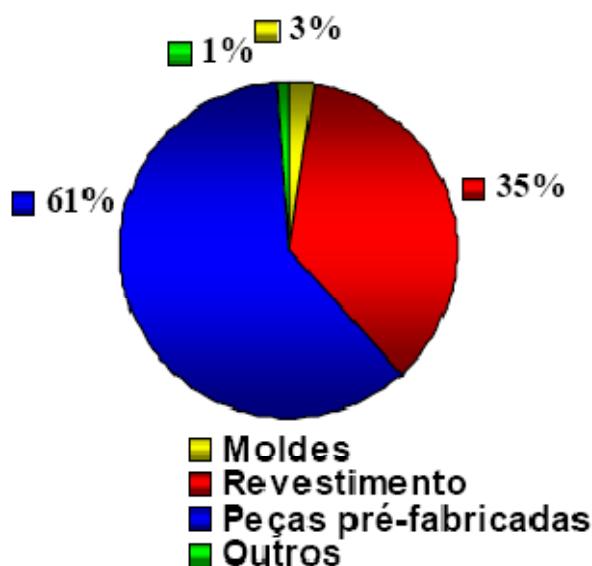


Figura 3.1 – Produção anual do Pólo Gesseiro (RIBEIRO, 2006)

Segundo CANUT (2006), o gesso brasileiro, por ser extraído utilizando diversos métodos e de várias jazidas, é definido como um material heterogêneo possuindo diferentes características e propriedades. As normas brasileiras focam em testes e ensaios para determinação das propriedades de tempo de pega, módulo de finura, físicas, mecânicas, dentre outras, como critérios para classificação do gesso.

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam algumas propriedades exigidas pelas normas brasileiras para gesso de construção civil.

Tabela 3.1 – Classificação do gesso para construção civil (NBR 13207, ABNT 1994)

Classificação do gesso	Tempo de pega (min)		Módulo de finura
	Início	Fim	
Gesso fino para revestimento	> 10	> 45	< 1,1
Gesso grosso para revestimento	> 10	> 45	> 1,1
Gesso fino para fundição	4 -10	20 - 45	< 1,1
Gesso grosso para fundição	4 -10	20 - 45	>1,1

Tabela 3.2 – Exigências químicas do gesso para construção civil (NBR 13207, ABNT 1994)

Determinações químicas	Limites (%)
Água livre	Máx. 1,3
Água de cristalização	4,2 a 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	Min. 38,0
Anidrito sulfúrico (SO ₃)	Min. 53,0

Tabela 3.3 – Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil (NBR 13207, ABNT 1994)

Determinações físicas e mecânicas	Unidade	Limite
Resistência à compressão (NBR 12129)	MPa	> 8,4
Dureza (NBR 12129)	N/mm ²	> 30,0
Massa unitária (NBR 12127)	kg/m ³	> 700,0

3.2 HIDRATAÇÃO

Quando a água entra em contato com o gesso, ocorre a reação química na qual o material hemihidratado é redihidratado. Segundo ANTUNES (1999), a hidratação do gesso pode ser resumida em três fenômenos: **químico de dissolução** – ao serem misturados com água os cristais do hemidrato se dissolvem dando origem a uma solução saturada de íons (Ca²⁺ e SO₄²⁻); **físico da cristalização** – os cristais de dihidratos⁴ se precipitam em forma de agulhas quando estão saturados; **mecânico do endurecimento** – ocorre o endurecimento da pasta devido o aumento da concentração dos cristais.

Quanto mais lenta a velocidade de pega e de hidratação, mais resistente vai ser o produto de gesso. Esta velocidade poderá ser influenciada pelos seguintes fatores:

⁴ Dihidrato – gesso contendo duas moléculas de água em sua composição química.

temperatura e tempo de calcinação – temperaturas e tempos de calcinação maiores levam a formação de um gesso com pega mais lenta, porém com mais resistência; **finura** – quanto maior a área específica do material, mais reativo ele será em presença de água, tornando-se assim de pega mais rápida; **quantidade da água de amassamento** – quanto maior a quantidade de água de amassamento, maior será o tempo para a saturação da solução e, de maneira análoga aos materiais cimentícios, quanto maior a relação água/gesso, menor será a resistência do material; **presença de impurezas** – no preparo das pastas a presença de impurezas acelera a pega por atuarem como núcleos de cristalização; **aditivos** – são aceleradores ou retardadores de pega, dependendo da finalidade proposta (ANTUNES, 1999).

3.3 MICROESTRUTURA

Para compreensão das propriedades mecânicas dos materiais de gesso faz-se necessário o estudo da formação e desenvolvimento da microestrutura, bem como os fatores que a influenciam (ANTUNES, 1999).

3.3.1 Microestrutura e fatores internos que a influenciam

A taxa de crescimento da microestrutura e o tamanho dos grãos hidratados são influenciados pela quantidade de núcleos presentes na solução. Quanto mais núcleos presentes na solução, mais rápido é o crescimento, formando-se grande quantidade de cristais por unidade de volume. Por outro lado, quando o número de núcleos é menor, a formação ocorre lentamente. Isto propicia a formação de cristais maiores. Estes fatores estão inter-relacionados e influenciam as propriedades mecânicas, pois cristais maiores geram produtos menos resistentes, devido à porosidade. De maneira inversa acontece o incremento de resistência com a formação de cristais menores, pois aumentam a densidade (MURAT et al. apud ANTUNES, 1999). Os cristais de dihidratos variam de

10 a 20 μm de comprimento e de 1 a 1,6 μm de largura (ODLER; RÖSSLER; HINCAPIÉ; SELMO et al. apud ANTUNES, 1999).

As propriedades do gesso também são influenciadas pela forma dos cristais de dihidrato que são geralmente em forma de agulha, mas podem sofrer alterações na presença de impurezas, conforme ilustrado na Figura 3.2 (ODLER; RÖSSLER; HINCAPIÉ; SELMO; DELGADO; PIRES SOBRINHO; JOHN; MURAT et al. apud ANTUNES, 1999).

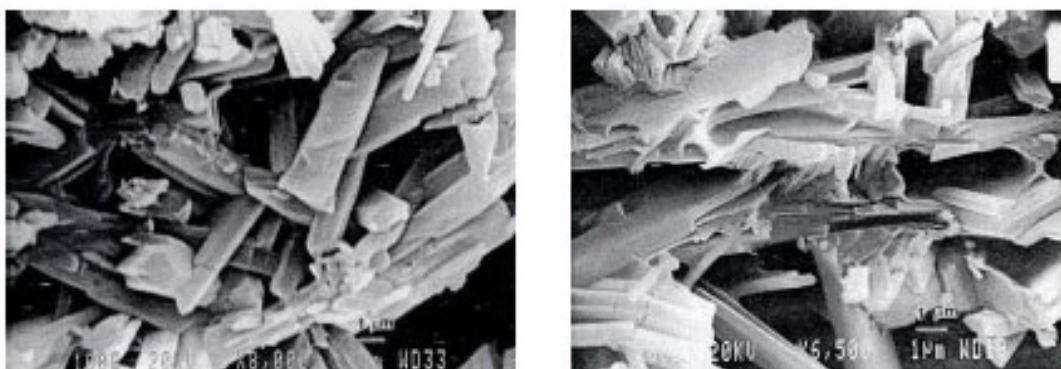


Figura 3.2 – À esquerda cristais dihidrato aumentados 8000X e a direita cristais dihidrato em presença de poliacrilamina aumentados 6500X (ANTUNES, 1999)

3.3.2 Microestrutura e fatores externos que a influenciam

O tratamento mecânico dado à superfície do gesso provoca a orientação dos cristais da região conformada. Isto confere maior compacidade a esta região e, conseqüentemente, melhora das propriedades mecânicas em relação ao interior da pasta (MURAT et al. apud ANTUNES, 1999).

Em presença de água as pastas endurecidas tendem a reduzir suas propriedades mecânicas, possivelmente porque quando a água penetra nos poros pode causar a dissolução e recristalização dos cristais instáveis formados no início da pega. Os cristais formados neste processo são maiores do que os originais, promovendo aumento da porosidade, além de modificação na estrutura de contato dos cristais (MURAT et al. apud ANTUNES, 1999).

Nos estudos de ODLER; RÖSSLER apud ANTUNES (1999), foi demonstrado que ao aumentar a temperatura durante a hidratação do gesso ocorre alargamento dos

cristais formados. Isto ocorre devido a queda da solubilidade provocada pela temperatura, que reduz o número de núcleos disponíveis para hidratação, provocando surgimento de poros maiores.

O tamanho e a forma dos cristais de dihidratos também podem ser influenciados pela relação água/gesso, pois, com o aumento desta relação, os cristais têm mais espaço para crescerem, conferindo maior porosidade ao material (ODLER; RÖSSLER apud ANTUNES, 1999).

3.4 PROPRIEDADES

Comercialmente o gesso é encontrado em forma de pó branco com elevada finura. Suas principais propriedades físicas, segundo ANDRADE et al. (2006), são densidade real de $2,35\text{g/cm}^3$, índice de refração de 1,53, dureza 2 na escala Mohs, elevada solubilidade e a cor depende das impurezas contidas nos cristais da gipsita, podendo variar entre incolor, branco, cinza ou amarronzado. Outras propriedades serão tratadas a seguir.

3.4.1 Isolamento térmico e resistência ao fogo

Os materiais de construção devem ser selecionados de forma a oferecer maior conforto térmico. Os materiais de baixa condutibilidade térmica atendem a esta exigência. A condutibilidade térmica do gesso é de aproximadamente $0,3\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$, podendo variar com a densidade do material. Comparando-o com outros materiais de construção, o gesso é um excelente isolante térmico (PETRUCCI apud CANUT, 2006).

Segundo SILVA, e SILVA, apud CANUT (2006), o fato de o gesso ser um material mineral e incombustível, confere a ele bom desempenho contra a ação do fogo, não necessitando maiores verificações com relação a esta propriedade.

3.4.2 Isolamento acústico

É o atrito gerado pela passagem do ar pelos poros do material absorvente, que sendo poroso e de baixa densidade, é o responsável pela dissipação de energia sonora (SILVA, e SILVA, apud CANUT, 2006). Portanto, segundo CANUT (2006) é a alta porosidade que confere esta propriedade ao gesso.

3.4.3 Aderência ao substrato

A aderência ao substrato é característica bastante apreciável quando se pretende utilizar o gesso como revestimento de tetos e paredes, principalmente.

Para CINCOTTO et al. (1995), a aderência dependerá das características de trabalhabilidade da argamassa, porosidade e rugosidade da superfície de contato.

Esta propriedade pode ser avaliada através de ensaios de arrancamento “in situ”. HASELEIN et al. apud CANUT (2006), encontraram em seus estudos resistência de arrancamento de 1,5MPa para pastilhas assentadas sobre revestimento de gesso. Este valor é bem superior, segundo o mesmo autor, aos valores encontrados para argamassas de cimento convencional. O autor ressalta ainda que a norma NBR 13749 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: especificação (ABNT, 1996), fixa a resistência mínima de arrancamento em apenas 0,3 MPa.

3.4.4 Trabalhabilidade e moldabilidade

A facilidade de manuseio por parte do operário que prepara e aplica a argamassa é que se considera, em termos práticos, a trabalhabilidade. Esta propriedade confere ao gesso moldabilidade (facilmente moldável) que é responsável por seu uso milenar em revestimentos de paredes e tetos, na fabricação de adereços decorativos e de adornos (CANUT, 2006).

A plasticidade e a consistência são as propriedades que caracterizam a trabalhabilidade. A plasticidade é influenciada pelo teor de ar, natureza do aglomerante e intensidade da mistura das argamassas, enquanto que a consistência é a propriedade pela qual a pasta tende a resistir às deformações que lhe são impostas no estado fresco (CINCOTTO apud CANUT, 2006).

3.4.5 Propriedades Mecânicas

Como apresentado no item 4.3.1, a microestrutura é influenciada pela relação água/gesso e conseqüentemente influencia as propriedades dos produtos a base de gesso.

A Tabela 3.4 representa, para diversas marcas de gesso do Brasil, um resumo dos valores típicos de propriedades mecânicas do gesso.

Tabela 3.4 – Intervalo de variação das propriedades do gesso no Brasil (ANTUNES, 1999)

Propriedade	a/g	(MPa)
Resistência à compressão	0,650 – 0,450	9,93 – 27,29
Resistência à tração na flexão	0,653 – 0,433	4,40 – 10,50
Dureza superficial	0,483 – 0,450	13,55 – 53,08
Resistência de aderência*	0,600 – 0,800	0,40 – 1,60

Segundo ANTUNES (1999), não há dados sobre módulo de elasticidade do gesso no Brasil. Porém este autor encontrou os dados da Figura 3.3 nos trabalhos de BLAKEY, NOLHIER e TESCHNER que relacionaram a perda do módulo de elasticidade em função do aumento da relação água/gesso. Esta perda foi de até 50% para a variação de 0,6 para 0,8 desta relação segundo, HINCAPIÉ et al. apud ANTUNES, 1999.

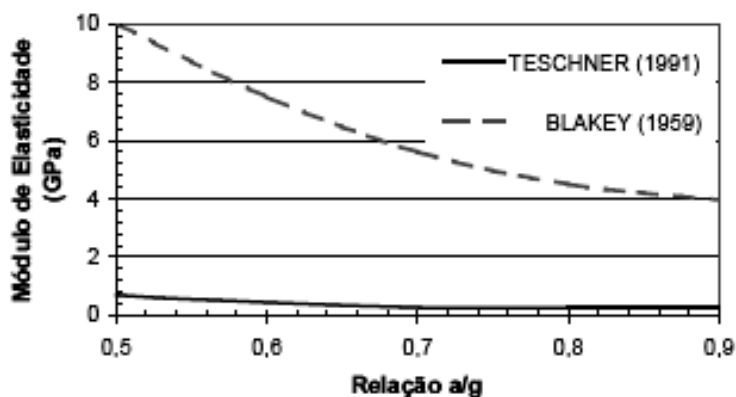


Figura 3.3 – Efeito da relação água/gesso no módulo de elasticidade (ANTUNES, 1999)

3.5 RESÍDUO DE GESSO

O desperdício estimado de gesso na Indústria da Construção Civil é de 45%. Para os fabricantes de gesso em pó, esta estimativa é de 30% (JOHN e CINCOTTO, 2003).

Na literatura, não foram encontradas estimativas precisas quanto a geração do RG na construção civil. A estimativa encontrada refere-se à cidade de Salvador onde, segundo CARNEIRO et al. (2001), o volume de RG junto com outros materiais como asfalto, vidro, metais ferrosos, espuma, couro, tecido e madeira é em torno de 2% do volume de RCD. RIBEIRO (2006) quantificou em seu experimento que o volume de RG gerado na cidade de Recife-PE é da ordem de 4%, com base na quantidade de entulho coletado oficialmente por dia. Isso representaria uma quantidade de 50m³ de RG por dia. Ele ainda pondera que a quantidade pode ser maior, pois há na cidade muita disposição clandestina de entulho.

Segundo JOHN e CINCOTTO (2003) a geração de entulho de gesso na Grande São Paulo é da ordem de 120.000 toneladas por ano.

Com base nos dados levantados de desperdício de gesso na construção civil, conclui-se que o volume de RG pode ser maior do que a estimativa apresentada. Esta estimativa pode ainda, não estar considerando o volume de RG que segue aderido (revestimento) ou misturado (pó) aos RCD classe A. Separar este RG que encontra-se aderido na forma de revestimentos de concretos e argamassas é inviável, devido à alta

aderência que o mesmo tem as bases minerais. Portanto parte do RCD, mesmo com toda a segregação e triagem antes da disposição final, conterà sempre uma certa quantidade de RG. Esta quantidade de RG segundo, SELMO (2004), pode contaminar em baixos teores os agregados reciclados.

As fontes de geração de RG na construção civil, segundo RIBEIRO (2006), são:

- gerados na aplicação do revestimento de gesso – durante a aplicação parte do gesso que é lançado em paredes e tetos cai no piso, endurecimento por perda no tempo de aplicação e pega, e perda incorporada por camadas mais espessas do que a prevista;
- gerado durante execução de forros – quebras de placas pré-fabricadas durante transporte, manuseio e aplicação;
- gerado durante a execução de elementos de decoração (sancas, moldura, rodapés, dentre outros) – sobras ou pedaços que se quebram também durante transporte e manuseio;
- gerado como moldes na fabricação de peças cerâmicas – após utilização os moldes viram resíduos;
- gerado durante demolição – geralmente estão contaminados com outros materiais;
- gerado no armazenamento do gesso (ensacado ou pó) – devido a umidade que acima de 70% acelera as reações.

Há ainda o resíduo de gesso originado de diversas outras aplicações de gesso, como por exemplo: o resíduo de gesso levemente contaminado com compostos orgânicos, estudado por OLIVEIRA et al. (1999) que era gerado na indústria química no processo de fermentação, gesso utilizado nos moldes para fabricação de diversas peças cerâmicas (velas de ignição, recipientes de vidro, bacias sanitárias, isoladores elétricos, dentre outros), gesso utilizado na medicina (ortopedia, por exemplo), na produção ou como molde de peças de artesanato e decoração, dentre outras aplicações.

Pela Resolução 307 do CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente, o gesso é classificado como sendo resíduo Classe C, que são os materiais para os quais ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação. Pela NBR 10004 (ABNT, 2004) o gesso é

classificado como resíduo não inerte, por isso não pode ser depositado nos aterros de construção, devendo ser separado dos demais resíduos por triagem.

A dificuldade de reciclagem e reutilização do resíduo de gesso está associada a diversos fatores. Dentre estes, a falta de separação deste resíduo no ponto de geração (fonte) resulta num resíduo geralmente contaminado com metais, perfis, madeira, papel e outros. Portanto, é necessário a criação de um plano de gerenciamento deste resíduo (CANUT, 2006). Outro fator, é que os sulfatos da composição química do gesso podem reagir com os aluminatos do cimento gerando etringita, que é bastante deletéria ao concreto, não podendo assim ser utilizado como agregado para este fim. O RG também não pode ser utilizado como agregado para aterro em pavimentação por ser solúvel e lixiviável pela água, o que ocasionaria a longo prazo o aparecimento de vazios no aterro (JOHN e CINCOTTO, 2003). Outro aspecto é que resíduo de gesso da indústria química contaminado com substâncias orgânicas não pode ser utilizado para revestimento em construção civil, porque pode propiciar o aparecimento de fungos (OLIVEIRA et al., 1999).

No entanto o resíduo de gesso já é mundialmente reciclado por empresas como: New West Recycling (Canadá), Knauf (Alemanha), Gipsrecycling (Dinamarca) que já fazem parte do mercado mundial de gestão e reaproveitamento de resíduos de gesso (JOHN e CINCOTTO, 2003).

O resultado do processo de reciclagem é um produto com a mesma composição da gipsita, que é o mineral que origina o gesso, devido a etapas de hidratação dos resíduos (CANUT, 2006).

Há também o reaproveitamento de RG da construção civil como corretivo de solos e retentor de umidade na área agrícola. (Marvin, 2000; CIWMB, 2003 apud CARVALHO, 2005).

JOHN e CINCOTTO (2003) apresenta como alternativas para a gestão do resíduo de gesso a utilização do mesmo em: forração para animais, secagem de lodo de esgoto, absorvente de óleos, aditivos para compostagem e controle de odores em estábulos.

A Gypsum Association, 2004 apud CARVALHO (2005) apresenta a alternativa de moer o gesso na obra e espalhar diretamente no solo com o limite de 22 toneladas por acre. Porém segundo o autor, em alguns estados norte-americanos esta prática é proibida.

CARVALHO (2005) realizou um estudo para reaproveitamento e reciclagem de RG oriundo de indústrias fornecedoras de placa e molduras de gesso e construtoras do estado de Goiás. Para tanto o estudo foi dividido em duas partes: a primeira tratou da reciclagem do RG de revestimento endurecido. O material foi beneficiado (britado e desidratado até estado de pó) e comparado com o gesso em pó comercial (referência). Ambos foram submetidos a teste de caracterização mecânica, física, química, espectroscopia de infravermelho, análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria diferencial exploratória (DSC), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X, retração por secagem, taxa de sucção inicial, calor de hidratação e verificação da trabalhabilidade e utilização. A segunda parte do estudo tratou do reaproveitamento do gesso antes do seu endurecimento durante a confecção de placas e molduras para produção de blocos de gesso, comparando-o com blocos cerâmicos maciços. A avaliação foi realizada segundo as exigências de normas brasileiras e estrangeiras para esses blocos, tendo realizado para tal os ensaios de resistência à compressão, densidade aparente seca, absorção, dimensões, eflorescência, percolação e determinação das propriedades químicas.

Como conclusão desses estudos, a reciclagem apresentou-se viável por não prejudicar as propriedades do gesso, apesar dos gessos reciclados terem apresentado perda de 30 a 45% da resistência mecânica. Esta perda foi justificada pela forma dos cristais verificados por MEV. Apesar da perda de resistência, o gesso reciclado manteve-se dentro dos padrões normativos. Para os demais ensaios não houve diferença significativa que inviabilizasse a utilização do gesso reciclado. Vale destacar que os produtos de gesso reciclado foram confeccionados com a mesma relação água/gesso do gesso de referência. Quanto ao reaproveitamento do gesso para fabricação de blocos, os resultados foram promissores no que concerne a resistência à compressão, que apresentou valores superiores aos mínimos exigidos por norma, porém a absorção foi em torno de 32% aos 60 dias. CARVALHO (2005) sugere que sejam realizados novos experimentos, verificando também a interação entre as paredes de blocos de gesso e os demais elementos construtivos.

Uma alternativa estudada por RIBEIRO (2006), foi a produção de gesso reciclado a partir de resíduos de gesso de construção civil. Em seu estudo ele analisou a produção de gesso reciclado a partir do resíduo de gesso de quatro aplicações na construção civil: revestimento de alvenarias, placas de forro, peças de decoração e molde para cerâmica. O RG de todas as aplicações, depois de quantificado, foi

beneficiado (seleção e trituração) e recalcinado. Foram realizados ensaios para determinação das propriedades químicas, físicas e mecânicas do gesso reciclado. A difração de raios-X mostrou muita semelhança entre os resíduos de gesso e a gipsita. A resistência à flexão do gesso reciclado não variou significativamente quando comparado ao gesso comercial. A diferença principal foi nos tempos de início e fim de pega, mas segundo o autor isto deve ser melhor estudado, pois o controle mais apropriado da granulometria do RG pode aproximar aos tempos de pega do gesso de referência. O trabalho conclui pela viabilidade da reciclagem de gesso, devendo-se atentar aos cuidados na segregação dos resíduos durante a execução dos serviços, a fim de evitar contaminação dos mesmos.

Outra alternativa para o resíduo de gesso pode ser a utilização do mesmo na indústria cerâmica. Como apresentado anteriormente nos estudos de OLIVEIRA et al., (1999) e ANDRADE, (2006). Apesar da solubilidade e lixiviação que o gesso é passível, a característica de encapsulamento dos materiais cerâmicos queimados pode resolver estes problemas. Além disso, espera-se também um acréscimo de resistência devido à melhoria no empacotamento da mistura e porque em altas temperaturas, o gesso apresenta-se na sua forma mais resistente que é a anidrita I, conforme descrito no item 3.1.1.

Na literatura pesquisada foram encontrados poucos estudos que analisassem a possibilidade do uso de RG de construção civil em substituição à parte da argila utilizada na massa para produção de cerâmica. Destes OLIVEIRA et al. (1998) e MONTEIRO et al. (1998) estudaram a incorporação de resíduo de gesso (RG) em cerâmica vermelha como estudos preliminares que serviram de base para a dissertação de mestrado de OLIVEIRA et al. (1999). O RG utilizado por OLIVEIRA et al. (1999) foi proveniente de indústria bioquímica na qual o processo fermentativo gera sulfato de cálcio hidratado, obtendo um resíduo levemente contaminado com ácido láctico. Neste estudo foram analisadas as propriedades massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água, retração linear, resistência à flexão, lixiviação e solubilização. O autor concluiu que até certos limites a incorporação não só é viável, como também traz vantagens para a cerâmica vermelha.

4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS

São inúmeros os trabalhos publicados avaliando a viabilidade da utilização de resíduos na indústria cerâmica. A maior parte desses estudos avaliou a incorporação de variados resíduos na produção de cerâmicas de revestimento ou em cerâmicas vermelhas, em detrimento dos demais tipos de materiais cerâmicos. A justificativa dada pelos autores para priorizar estes dois tipos de cerâmica é porque ambos utilizam grandes quantidades de matérias primas em sua produção.

ANDRADE et al. (2005) estudaram a incorporação de fonolito fornecido pela empresa de mineração de Curimbaba, de Poços de Caldas no estado de Minas Gerais, em cerâmicas de revestimento prensado do tipo semiporoso. O resíduo foi incorporado nas proporções de 20 e 40%. Foram moldados por prensagem corpos-de-prova cilíndricos, que foram sinterizados em temperaturas variando de 1050 à 1200°C. Os resultados mostraram que a adição de fonolito melhorou a sinterização da argila, reduzindo a porosidade pela formação da fase líquida.

MODESTO et al. (2003) analisaram o efeito da incorporação, em cerâmica de revestimento, de resíduos sólidos extraídos do lodo proveniente das estações de tratamento de efluentes do processo de fabricação de placas cerâmicas. Os corpos-de-prova foram prensados com dimensões 70 mm X 30 mm e queimados à 1115°C em um ciclo de 60 minutos. As propriedades físicas estudadas demonstraram a viabilidade da utilização dos resíduos devido ao aumento da resistência à flexão, consequência da menor granulometria dos resíduos.

Na literatura foram identificados alguns trabalhos que avaliaram a incorporação do resíduo de gesso (RG) em materiais cerâmicos, como uma alternativa à utilização deste resíduo.

OLIVEIRA et al. (1999) utilizaram o resíduo de gesso proveniente de indústria bioquímica da cidade de Campos no estado do Rio de Janeiro, na qual o processo fermentativo gera sulfato de cálcio hidratado, obtendo um resíduo levemente contaminado com ácido láctico. Foram utilizados três tipos de argilas (A, B e C) da região norte do estado do Rio de Janeiro. Para os materiais determinou-se composição química, dimensões das partículas e coloração. Neste estudo foram moldados por prensagem corpos-de-prova de tijolos maciços com dimensões 200 X 100 X 50mm e

por extrusão corpos simulando a produção de tijolos vazados com 100 X 20 X 10mm. Ambos os CPs foram sinterizadas por quatro horas, nas temperaturas de 650, 750, 850, 950 e 1100 °C, com adição de RG em proporções de 5, 10, 15, 20, 30, 40 e 50%. Para as amostras tanto, prensadas quanto extrusadas, foi avaliada a resistência à compressão. Observou-se um decréscimo contínuo da resistência com o aumento do percentual de RG adicionado. Isso pode ser explicado pela formação de porosidade por decoesão das partículas dos resíduos, ou seja, o resíduo sofre descolamento da matriz de argila devido a diferença de módulo de elasticidade. Este comportamento foi verificado por análise estrutural realizada por microscopia eletrônica de varredura. As outras propriedades físicas analisadas não sofreram alterações significativas com o aumento da adição de RG. Exceto para a temperatura de 1100°C, em que a densificação da cerâmica é mais sensível à adição do resíduo. Da análise das diferentes argilas, há a confirmação de que o tipo de resíduo influi na resistência da cerâmica. Por outro lado, os ensaios de lixiviação e solubilização não mostraram possibilidade de riscos ambientais associados à presença do RG.

ANDRADE et al. (2006) também utilizaram resíduo de gesso da construção civil em argila. Foi utilizada argila vermelha extraída da região do Seridó do Rio Grande do Norte para produção de blocos e telhas. O resíduo de gesso utilizado foi proveniente de revestimento interno de obras de construção civil. Foram moldados por prensagem os corpos-de-prova com dimensões 5 X 16 X 58mm, que foram sinterizados à temperatura de 950°C com patamar de queima de 60 minutos. O resíduo de gesso foi adicionado à argila nas proporções de 5, 10, 15 e 20%, em relação à massa de cerâmica. Quanto às propriedades estudadas foi verificado que a densidade aparente aumenta com o acréscimo de RG; a absorção aumentou consideravelmente com o acréscimo de RG indicando maior porosidade, embora o resultado ainda atenda às especificações para fabricação de tijolos e telhas; a resistência à flexão reduziu com o aumento da adição de RG. Este comportamento pode ser explicado, segundo os autores, pela redução da trabalhabilidade da massa de argila, devido a redução de plasticidade provocada pela adição do resíduo.

O resíduo estudado por ACCHAR et al. (2006) foi o da serragem de rochas ornamentais (mármore e granitos) de indústrias do estado brasileiro do Rio Grande do Norte. Foi determinado o diâmetro das partículas e a composição química da argila, do resíduo de mármore e do resíduo de granito, com ambos os resíduos apresentando

tamanho de partícula superior ao da argila e característica não plástica. Isto pode beneficiar o controle da plasticidade e reduzir a retração na secagem.

No estudo de ACCHAR et al. (2006) foram moldados, pelo método da prensagem, corpos-de-prova com dimensões 100mm X 10mm X 10mm com misturas contendo 70% de argila e 30% de resíduo. As amostras foram sinterizadas, por duas horas, em temperaturas que variaram de 950 à 1150°C. As propriedades avaliadas foram: retração na queima, na qual a amostra contendo resíduo de mármore (RMAR) apresentou menor retração do que a amostra contendo resíduo de granito (RGRA); porosidade, que mostrou-se maior para a amostra contendo RMAR, o que pode ser explicado pelo maior tamanho de partícula deste resíduo; tensão de ruptura à flexão, com a amostra contendo RMAR apresentando, para temperaturas abaixo de 1000°C, maior resistência e para temperaturas acima deste valor, menor resistência que a mistura contendo RGRA. Também foi avaliada a microestrutura, observou-se que a amostra contendo RMAR apresentou maior porosidade que a amostra contendo RGRA. O estudo conclui que ambos os resíduos podem ser utilizados na indústria cerâmica.

MENEZES et al. (2002)b utilizou resíduo de granito de três empresas do estado da Paraíba. Os percentuais de substituição variaram de 20% até 50%, além da mistura de referência sem resíduo. Os corpos-de-prova foram moldados à extrusão, com dimensões de 20cm x 2cm x 2cm. As amostras foram sinterizadas durante duas horas nas temperaturas de 800°C, 900°C e 1.000°C. Quando avaliadas as propriedades, os resultados revelaram que à medida que se aumentou o teor de resíduos, a absorção também aumentou. Quanto ao módulo de ruptura à flexão, houve um pequeno acréscimo com o aumento do teor de substituição de até 20%, seguido de um decréscimo para teores acima de 25% a 30% de resíduo. Porém, segundo os autores, os valores encontrados de absorção para todos os teores analisados são inferiores aos estabelecidos para blocos furados. Os valores encontrados para módulo de ruptura à flexão são maiores que o mínimo estabelecido para blocos furados (5,5 MPa), até um teor de 50% de resíduo, indicando assim a reutilização desse resíduo na produção de materiais cerâmicos.

MOREIRA et al. (2003) utilizaram no seu trabalho resíduo da serragem de granito proveniente da região de Cachoeiro do Itapemirim – ES. Foram preparadas três misturas com adições de até 10% em massa do resíduo. Os corpos cerâmicos foram obtidos por prensagem uniaxial de 26MPa, numa matriz retangular (11,50 X 2,54 X 1,0cm³). As temperaturas de queima variaram de 850 à 1150°C, mantidos durante duas

horas na temperatura final. Das propriedades avaliadas verificou-se que com o aumento da temperatura a retração linear aumentou, embora estes valores estejam dentro da margem para produção industrial. Já a absorção diminuiu com o aumento da temperatura. Verificou-se pouca alteração nesses parâmetros para temperaturas entre 850 e 950°C, devido à baixa sinterização das amostras nestas temperaturas. Verificou-se também que a adição do resíduo tende a reduzir a retração. Quanto à massa específica aparente e a porosidade aparente, estes parâmetros seguiram o mesmo comportamento apresentado para absorção de água. A tensão de ruptura à flexão apresentou crescimento com o aumento da temperatura, isto deve-se a estrutura mais densa e fechamento da porosidade. Em seu estudo os autores concluíram que o resíduo de serragem de granito pode ser uma alternativa de matéria-prima para a indústria cerâmica.

MOREIRA et al. (2005), utilizaram um resíduo de rocha ornamental do tipo gnaisse da região de Santo Antônio de Pádua – RJ. Foram preparadas cinco massas cerâmicas com adições de até 20% de resíduo, em massa. A produção dos corpos-de-prova obedeceu ao método explicitado no seu trabalho anterior (MOREIRA et al., 2003). Quanto às propriedades avaliadas, a retração linear aumenta com o aumento da temperatura, a massa específica aparente também aumenta com a temperatura em decorrência da sinterização, para todos os teores de adição. A absorção de água diminuiu, como esperado, com o aumento da temperatura. A tensão de ruptura à flexão teve um acréscimo acentuado com o aumento da temperatura, corroborando com os resultados obtidos para as demais propriedades.

SABOYA JR et al. (2006) avaliaram a incorporação do pó da serragem da produção de chapas de mármore, com o objetivo de avaliar a melhoria das propriedades dos blocos cerâmicos com incorporação deste resíduo. Para tanto, elaboraram misturas contendo cinco teores de adição do resíduo, em massa, variando de 0% (mistura de referência) até 20%. A moldagem dos corpos-de-prova, com dimensões de (130 x 27 x 17)mm, foi por extrusão. As temperaturas de queima utilizadas no estudo foram de 750, 850 e 950 °C. Quanto às propriedades analisadas a absorção de água aumentou com o aumento do teor de adição, ficando dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileiras, exceto para mistura sinterizada a 750°C contendo 20% de adição. A retração linear aumentou com o aumento da temperatura, mas apresentou uma tendência de redução com o aumento do teor de adição. A massa específica aparente teve o comportamento similar ao apresentado pela retração linear. A tensão de ruptura à flexão teve maior valor para a amostra contendo 20% de adição, sinterizada à temperatura de

850°C. O esperado seria o maior valor da tensão para a temperatura de 950°C. Isto pode ter acontecido porque em temperaturas acima de 950°C a metacaulinita transforma-se em mulita, produzindo considerável retração.

BALATON et al. (2002) avaliaram a influência da incorporação de resíduo sólido galvânico formado por metais utilizados no processo de galvanização, decantados por um aditivo à base de ferro, nas propriedades físicas das cerâmicas. Esta avaliação se fez necessária, porque para inertizar os constituintes da lama galvânica, esta foi introduzida no material cerâmico. Para realização dos ensaios foi preparada uma mistura de referência (sem resíduo) e três misturas, sendo duas delas com lama galvânica comum, com teores de 2% e 5%, e uma mistura com lama galvânica lavada com o teor de 2%. Os corpos-de-prova foram moldados por extrusão com dimensões de (150 x 15,5 x 15,5)mm e queimados nas temperaturas 850, 900 e 950°C. Com o teor da lama de 2% ou maior ocorreu a formação de eflorescências na superfície das amostras durante a secagem, devido à quantidade de sais solúveis presentes no resíduo. Efetuou-se então uma lavagem no resíduo antes da sua adição na massa cerâmica. Com isso, pôde-se observar, que não houve alterações significativas nas propriedades da massa referencial para teores de até 2% de resíduo. Com o teor de 5% de adição do resíduo galvânico, a massa referencial, teve como consequência o aumento da porosidade do corpo cerâmico, causado pela formação da eflorescência, fazendo a resistência à flexão reduzir e a absorção de água aumentar, deixando os corpos-de-prova com aspecto de ferro oxidado, tornando a massa inadequada ao uso. Para as amostras com 2% de resíduo (lavado ou não) não houve alteração da cor. Os testes de solubilização e lixiviação foram realizados apenas na mistura contendo resíduo lavado. Estes testes mostraram que houve inertização dos metais, apresentando apenas teores do óxido de ferro acima do preconizado, mas estes valores também foram encontrados na massa de referência.

CAMARGO et al. (2005) adicionaram metais tóxicos na forma de óxidos de cádmio, chumbo, cromo, cobre, níquel, zinco e cobalto, para avaliar a estabilidade destes metais frente aos agentes lixiviantes. Foram preparadas misturas da massa de argila com 0,3%, 1%, 3% e 10% de cada óxido. As misturas foram prensadas para formar corpos-de-prova com dimensões (6,0 x 2,0 x 0,5)cm. Os corpos-de-prova foram sinterizados a temperaturas de 650 e 850°C, com tempo de cozimento de três horas. Em geral os resultados de tensão de ruptura à flexão em temperatura ambiente, massa específica aparente, variação linear dimensional, absorção de água e porosidade aparente das amostras contendo óxidos sinterizados a 850°C foram próximos da massa

de referência, tendo variações significativas acima desta temperatura. Com relação à cor do corpo cerâmico, houve variação de acordo com a porcentagem de óxido adicionado e com a temperatura em que o corpo foi sinterizado. Em geral, a tendência das cores em função do aumento da temperatura e sinterização foi o escurecimento.

MENEZES et al. (2002) apresentaram um estudo sobre o que havia disponível na literatura quanto aos resíduos que poderiam ser utilizados como matéria-prima cerâmica. Este levantamento englobou diversos estudos que levaram o autor a dividir os resíduos em quatro tipos: redutores de plasticidade, fundentes, que podem ser utilizados no processo de queima e combustíveis. Os rejeitos apresentados neste levantamento como redutores de plasticidade são: pó de basalto, pó de granito, lama de chamota, pó de cimento, dolomita, pó de rocha, chamota refratária; como fundentes são: resíduo da indústria de aço, lama de esmaltação, hidróxidos de metal, resíduos cerâmicos; os que podem ser utilizadas no processo de queima são: lama de lavagem de lã, lama da indústria de papel, exaustão de óleos minerais, resíduos das indústrias têxtil, de curtumes, de azeitonas, resíduos da serragem de madeira, coque de petróleo, resíduos da extração e tratamento do carvão, resíduos da noz de coco, cinzas; e como combustíveis tem-se: lama de esgoto, lodo orgânico, turfa, casca de arroz, entre outros. O autor enfoca que a indústria cerâmica é uma fonte economicamente viável e ecologicamente correta para reciclagem de resíduos.

NASCIMENTO (2002) analisou a incorporação do resíduo de fluoreto de cálcio proveniente de uma indústria do Pólo Petroquímico de Camaçari – BA. Foram preparadas quatro misturas contendo 0, 3, 5 e 8% em massa do resíduo. Os corpos-de-prova foram conformados por extrusão com dimensões (200 x 20 x 5)mm. Os CPs foram queimados às temperaturas de 800, 900 e 1000°C. Quanto às propriedades avaliadas, a cor das amostras contendo resíduos foi compatível com o uso em cerâmica vermelha. A retração linear não foi influenciada significativamente pela adição até a temperatura de 900°C, mas teve um aumento gradual quando queimadas a 1.000°C. A absorção de água e a porosidade aparente decresceram, à medida que aumentou a temperatura e o teor de adição do resíduo. O módulo de resistência à flexão sofreu pequena influência para temperatura de sinterização até 900°C, porém quando queimados a 1.000°C o módulo aumentou à medida que aumentou o teor de resíduos. Quanto à solubilidade, as amostras analisadas apresentaram valores de concentração acima do estabelecido em normas, sendo então classificados os materiais com este

resíduo como Não Inerte – Classe II. Quanto à lixiviação os testes demonstraram que os valores obtidos estão dentro dos limites aceitáveis.

OLIVEIRA et al. (2004) analisaram a incorporação do resíduo proveniente do setor siderúrgico, definido como pó de granulometria fina e rico em óxidos de ferro, em teores de 0; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0% em massa. Os corpos-de-prova foram moldados por extrusão nas dimensões (110 x 28 x 18)mm e queimados em temperaturas que variaram de 850 à 1050°C. Quanto às propriedades, a retração linear apresentou valores satisfatórios para as temperaturas empregadas, a absorção de água não sofreu alterações significativas com a adição dos resíduos de siderurgia até 950°C, a partir desta temperatura a absorção de água apresenta variação. A tensão de ruptura cresceu com o aumento da temperatura, porém com o aumento do teor de adição do resíduo o comportamento quanto a esta propriedade torna-se indefinido.

VIEIRA et al. (2004) analisaram a incorporação de chamote, que é resíduo da própria indústria cerâmica. Foram preparadas misturas com 0, 5, 10 e 20%, em massa de chamote. Os corpos-de-prova foram conformados por extrusão e queimados em forno industrial à temperatura de 970°C. Os resultados indicaram que a incorporação do chamote melhorou as características de secagem. A porosidade não sofreu alterações significativas com a incorporação do chamote. Isto indica que a queima do chamote em temperaturas maiores a que ele foi obtido, propicia sua própria sinterização, não ocasionando alterações deletérias na microestrutura das cerâmicas queimadas.

VIEIRA et al. (2007c) analisaram o efeito da utilização de laterita. A laterita é designada como depósito residual de óxido de ferro hidratado, associado geralmente com alumina e sílica, decorrente do processo de laterização. Foi utilizada neste estudo a laterita de formação de barreiras e argila, provenientes do município de Campos, no estado do Rio de Janeiro. Foram preparados corpos-de-prova por prensagem com dimensões (114,5 X 25,4 X 10,0)mm, sendo incorporando na argila 0, 10, 20, 30 e 40%, em massa de laterita. Os corpos-de-prova foram sinterizados nas temperaturas de 700, 900 e 1100°C. Os resultados indicaram que a incorporação de laterita não alterou significativamente as propriedades: resistência à flexão, absorção de água e retração linear. Exceto para a temperatura de 1100°C, na qual os corpos-de-prova apresentaram perda acentuada na resistência à flexão, acompanhado pelo aumento significativo da absorção. Isso foi atribuído a granulometria grosseira e o efeito refratário da laterita. Porém, a trabalhabilidade foi melhorada com a redução do limite de plasticidade e índice de plasticidade. Como conclusão os pesquisadores indicaram que a laterita pode

ser uma matéria-prima para fabricação na produção de cerâmica vermelha, em substituição ao quartzo, nas temperaturas de 700 e 900°C, que são comumente praticadas pelas indústrias.

SOUZA et al. (2008), em seus estudos, analisaram as alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro. Para tal, foram moldados, por prensagem, corpos-de-prova com 0, 5, 10, 20 e 30% de rejeito, que foram sinterizados nas temperaturas de 700, 900 e 1100°C. Os corpos-de-prova foram avaliados por microscopia eletrônica de varredura para análise microestrutural, por difração de raios-X para identificação das fases cristalinas e porosimetria de intrusão de mercúrio para determinação da distribuição de tamanho de poros. Do presente estudo as principais conclusões foram que a alteração mais significativa foi que o incremento de hematita contribui para conferir a coloração mais avermelhada da cerâmica. Pela porosimetria observou-se uma redução da porosidade com até 10% de incorporação do rejeito. Até este mesmo percentual de incorporação, a avaliação da superfície mostrou que apesar da grande quantidade de defeitos, como poros e trincas, o rejeito de minério de ferro atua como material de preenchimento, reduzindo a porosidade da cerâmica.

VIEIRA et al. (2007a) estudaram a cerâmica vermelha incorporada com lama fina de aciaria, rejeito do despoeiramento a úmido de aciaria. O teor de ferro desta lama é de 75 a 80%. Para este estudo, a lama obtida foi proveniente do sistema de despoeiramento de convertedores de LD. Foram conformados por prensagem corpos-de-prova, com dimensões (114 x 25 x 11)mm, incorporados com 0, 5, 10 e 20% de lama de aciaria. Os corpos-de-prova foram sinterizados na temperatura de 900°C, com permanência no forno durante 60 minutos. Quanto às análises realizadas, verificou-se a presença de hematita, sendo a mesma considerada influente na determinação da cor avermelhada da cerâmica. A resistência à flexão até o percentual de 5% de incorporação não apresentou alteração significativa. Porém acima deste teor há queda em média de aproximadamente 30% da resistência. Este comportamento deve-se, possivelmente, a natureza inerte do resíduo, por reduzir o volume de argila e por suas partículas não aderirem a matriz argilosa, o que pôde ser observado pela microscopia eletrônica de varredura. A avaliação ambiental feita por lixiviação e solubilização demonstrou que apenas o Al lixiviou, em teores nove vezes superior ao limite aceitável por norma.

PINHEIRO et al. (2008) estudaram a reciclagem de resíduo proveniente da produção de papel, em cerâmica vermelha. Este resíduo ocorre em forma líquida com

alto teor de sólidos em suspensão. Ele passa por um processo de tratamento primário e desaguamento, formando um “lodo primário” composto basicamente de caulim, celulose, traços não significativos de substância química e água. Foram conformados por prensagem corpos-de-prova com dimensões (114 x 25 x 11)mm, incorporados com 0, 3, 5 e 10% em massa de resíduo. Os CPs foram sinterizados na temperatura de 750°C com permanência no forno durante 120 minutos. Quando analisada a absorção dos corpos-de-prova cerâmicos, verificou-se que esta aumentou em 8,5 e 24,4% para incorporação de 5 e 10%, respectivamente, de resíduo, como conseqüência do aumento da porosidade. A retração linear, dentro do erro estatístico admissível, não apresentou alteração significativa. A resistência à flexão diminui para teores de resíduo maiores que 5%. A análise microscópica MEV demonstrou um aspecto grosseiro, textura rugosa e porosidade interconectada. O aspecto de lamelas ainda existentes na matriz amorfa é indicativo de baixo grau de sinterização da cerâmica. Estas características, segundo o autor são determinantes para a baixa performance mecânica do material. Apesar disso a conclusão é de que a incorporação do resíduo é tecnicamente viável, porém deve-se optar por incorporar percentuais abaixo de 3% do resíduo.

CAMPELO et al. (2006) estudaram a utilização do resíduo cerâmico queimado (“chamote”) como aditivo na fabricação de telha. O resíduo utilizado foi oriundo do Pólo Oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru – AM. O resíduo é composto de pedaços de telhas quebradas após queima, este resíduo foi coletado na saída do moinho de bolas utilizado para moagem do resíduo. Foram conformados por prensagem corpos-de-prova com dimensões 60 mm X 20 mm X 5 mm, incorporados com 3 e 5% em massa de resíduo. Os CPs foram sinterizados nas temperaturas de 850 e 950°C. Para os percentuais de incorporação de resíduos 3 e 5%, houve aumento na absorção de água de 3,9 e 5,2% e perda no módulo de resistência à flexão de 16,9 e 33,8%, respectivamente, quando queimados a 850°C. Quando queimados a 950°C o aumento foi de 1,6 e 3,4% na absorção e perda de 14,2 e 16,2% no módulo de resistência à flexão. A retração linear foi reduzida com a incorporação do resíduo. A conclusão do estudo é que há viabilidade para o uso do resíduo, com até 5% de incorporação, para temperatura acima de 950°C. Porém, como a temperatura usual da produção de telhas é de 850°C deve-se utilizar no máximo 5% de resíduo.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nos experimentos desse estudo e os métodos adotados para amostragem, coleta e caracterização dos materiais, preparação das massas de argila, conformação e ensaios dos corpos-de-prova.

5.1.1 Argila

Para desenvolvimento desta pesquisa foi utilizada uma mistura de quatro solos argilosos, utilizados no processo produtivo de telhas e blocos cerâmicos por uma indústria de cerâmica vermelha, localizada no município de Alagoinhas-Ba. Este município está localizado na Região Metropolitana de Salvador, no pólo Alagoinhas/Entre-Rios/Inhambupe, segundo definição de SICM (2005). Segundo este autor foi realizado um estudo de dois importantes depósitos de argila deste pólo. Desses destaca-se o depósito da localidade denominada Encantado, situado há 14km ao norte de Alagoinhas, cortado pela rodovia BA-110 e que ocupa uma área de aproximadamente 6,4km². Caracteriza-se por ser uma jazida horizontalizada, geologicamente relacionada a formação Marizal e com espessura de argila em torno de 10 metros. É constituída, do topo para a base, por argila variegada, de cor esbranquiçada, com manchas vermelhas, de natureza caulinítica e refratária, com teores de Fe₂O₃ abaixo de 2% e K₂O em torno de 1%; em seguida, uma camada que repousa sobre um arenito amarelo, de argilito vermelho a ocre ou lilás, bastante plástico e fundente, cor de queima a 1100 °C avermelhada, com teores de Fe₂O₃ próximos a 10% e K₂O entre 1% e 2%; sob esta ocorre uma camada de argilito de cor cinza, fundente, com cor palha, quando queimada a 1100 °C e com teores de Fe₂O₃ em torno de 3% e K₂O entre 1,5% e 3%. A reserva estimada desta jazida é de 13 milhões de toneladas.

A jazida destes solos pertence à fazenda onde a indústria está localizada. Após a extração, as argilas (solos) são transportadas por tratores e estocadas no pátio, onde passam pelos processos de homogeneização e secagem natural ao ar livre. Em seguida, as argilas são encaminhadas, nas proporções pré-definidas pela indústria, para a linha de produção.

Por ser segredo industrial, a cerâmica forneceu como matéria-prima a mistura pronta, ou seja, que tinha passado por todos os processos de produção, exceto a conformação. A amostra (argila) foi coletada na esteira que transporta a massa pronta do laminador para a maromba onde seria conformada. A Figura 5.1 apresenta uma esteira depositando o material, após laminação, na entrada da maromba.



Figura 5.1 – Esteira com material após laminação

5.1.1.1 Caracterização da argila

A caracterização da argila utilizada nesta pesquisa foi composta pelos ensaios de análise granulométrica, determinação da massa específica dos grãos, determinação do limite de liquidez, determinação do limite de plasticidade e análise química.

5.1.1.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada em atendimento à norma NBR 7181 (ABNT, 1984). Esta análise envolveu os ensaios de granulometria por peneiramento e por sedimentação. Para esta análise a argila coletada foi seca ao ar livre por seis dias. Após secagem a argila foi quarteada até obter aproximadamente 2kg. Esta quantidade foi destorroada com o auxílio de almofariz. O peneiramento consistiu na passagem da amostra de argila pelo jogo de peneiras com as malhas 2,0mm, 1,20mm, 0,60mm, 0,42mm, 0,30mm, 0,15mm e 0,075mm, sendo pesado o material retido nestas peneiras. A Figura 5.2 apresenta seqüência de preparação da amostra e peneiramento.



Figura 5.2 – Preparação da amostra e peneiramento. (a) secagem ao ar; (b) quarteamento; (c) peneiramento; (d) quantidade retida.

O material passante na peneira de malha 0,075 mm foi encaminhado para realizar o ensaio de sedimentação. Este ensaio consta das etapas de pesagem, dispersão com defloculante, sedimentação em proveta e pesagem a úmido. A Figura 5.3 apresenta o ensaio de sedimentação.

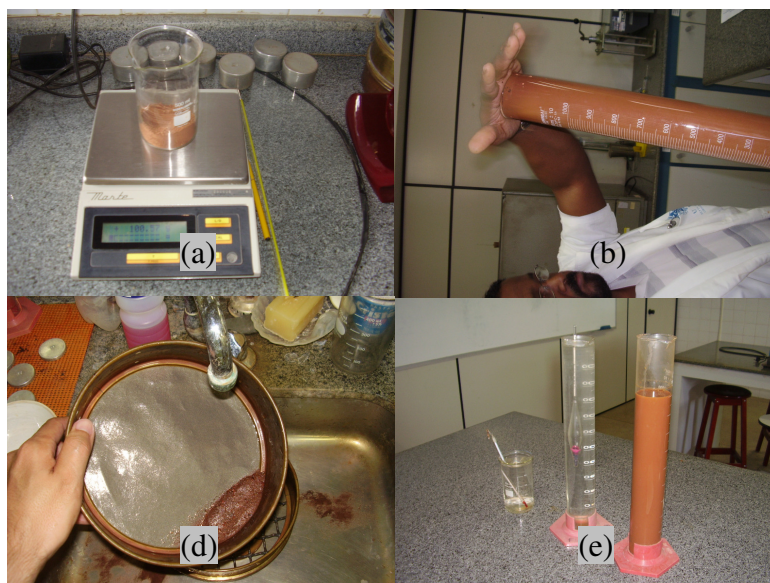


Figura 5.3 – Ensaio de sedimentação. (a) pesagem; (b) agitação da proveta; (c) sedimentação; (d) peneiramento úmido

A Tabela 5.1, apresenta os percentuais retidos nas peneiras e os percentuais obtidos no ensaio de sedimentação.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de sedimentação e peneiramento

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA						
AMOSTRA Nº		1570				
FURO Nº		-				
PROFUNDIDADE (m)		-				
		TEMPO	Ø DOS GRÃOS	% QUE PASSA		
		(min)	(mm)			
GRANULOMETRIA	PENEIRAS (% PASSA ACUMULADA)	Nº 10 (2,00mm)	99,9	0,5	0,054	79,1
		Nº 16 (1,20mm)	99,5	1	0,038	79,1
		Nº 30 (0,60mm)	98,8	2	0,027	79,1
		Nº 40 (0,42mm)	98,0	4	0,018	76,0
		Nº 50 (0,30mm)	95,9	18	0,011	71,4
		Nº 100 (0,15mm)	92,9	15	0,010	69,9
		Nº 200 (0,075mm)	90,0	30	0,007	65,2
		-	-	60	0,005	59,0
		-	-	120	0,004	54,6
		-	-	240	0,003	50,1
-	-	480	0,002	45,4		
S.U.C.S.	CL	1440	0,001	39,8		
H.R.B.	A-7-6 (14)	-	-	-		

A Figura 5.4 apresenta a curva granulométrica conjunta (peneiramento e sedimentação).

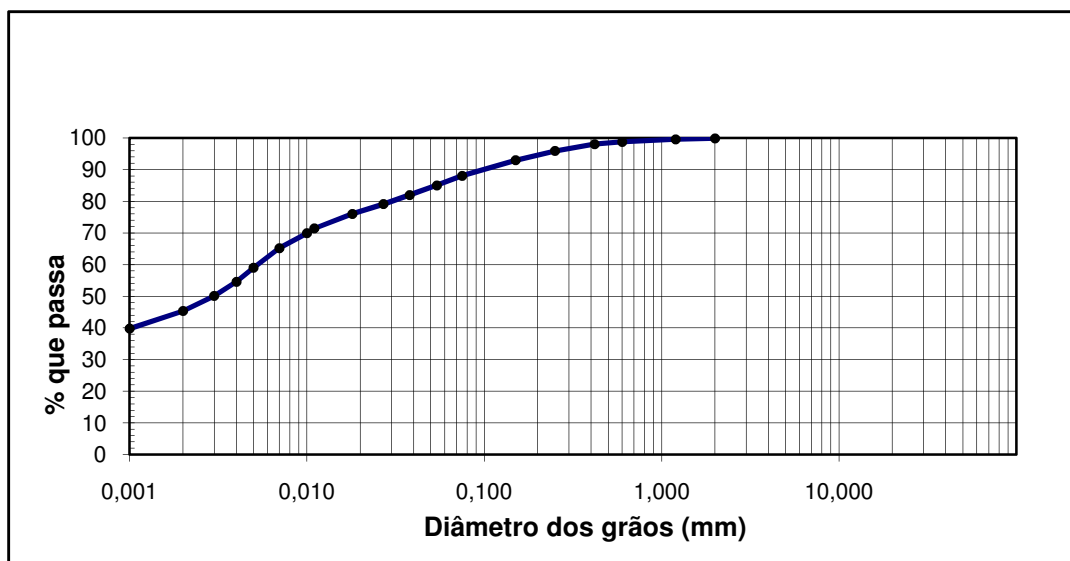


Figura 5.4 – Curva granulométrica conjunta da argila utilizada

A Tabela 5.2 apresenta a partir dos ensaios de sedimentação e peneiramento o fracionamento do material analisado segundo a classificação da NBR 6502 (ABNT, 1995). Este fracionamento indica a classificação do material como *argila siltosa*.

Tabela 5.2 – Fração de material e classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995)

CLASSIFICAÇÃO	FRAÇÃO (%)
Pedregulho	0,1%
Areia grossa	0,9%
Areia média	4%
Areia fina	9%
Silte	40,6%
Argila	45,4%

5.1.1.1.2 Determinação dos limites de consistência

Os limites de consistência também chamados de Limites de Atterberg foram determinados para a argila estudada, seguindo os preceitos da NBR 6459 (ABNT, 1984) para o limite de liquidez, da NBR 7180 (ABNT, 1984) para o limite de plasticidade e índice de plasticidade.

Para determinação do limite de liquidez a amostra passou pelos processos de secagem em estufa à 110°C, umedecimento cuidadoso até que ficasse moldável e sem fissuras. O ensaio é realizado no aparelho de Casagrande. A Figura 5.5 apresenta a seqüência do ensaio de determinação do limite de liquidez.

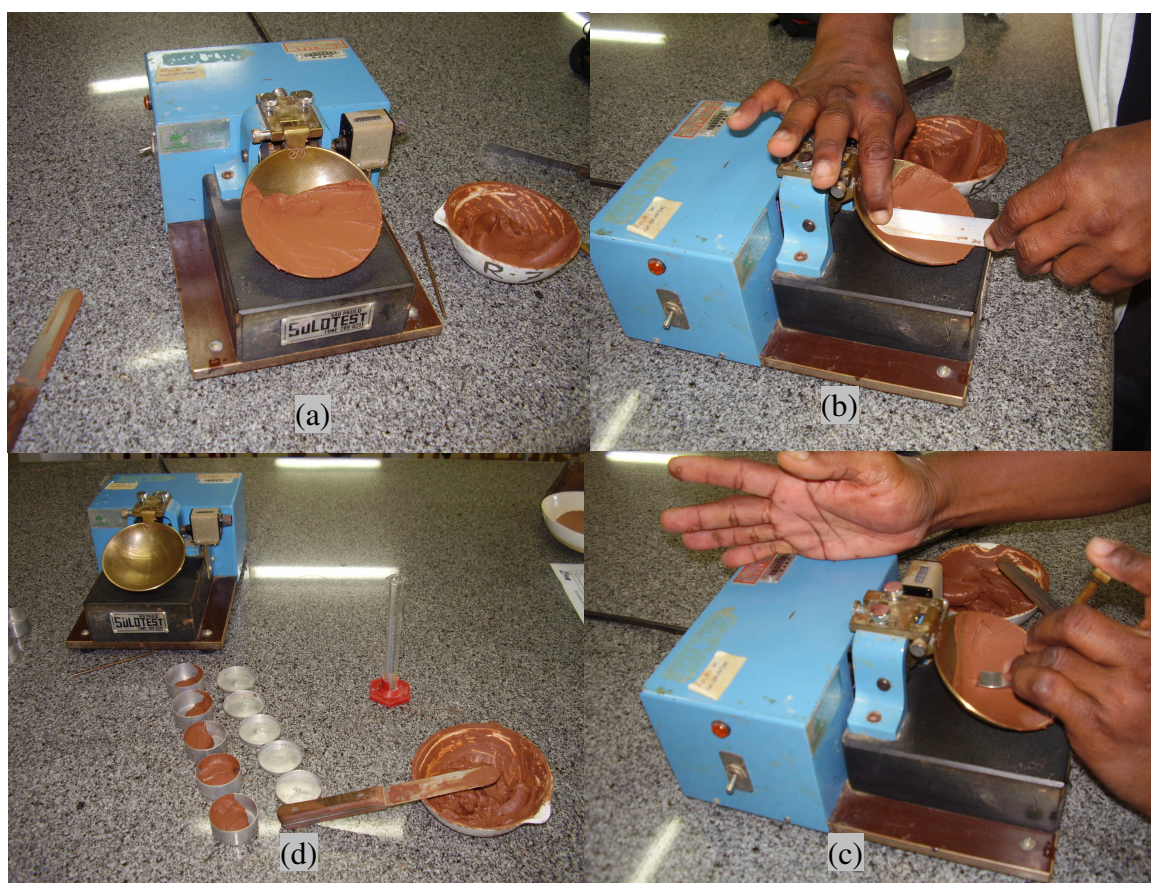


Figura 5.5 – Determinação do limite de liquidez. (a) material colocado na concha; (b) retirada do excesso com espátula; (c) rasgo com sizel; (d) amostra para verificação da umidade.

Assim como na realização do ensaio de determinação do limite de liquidez, para determinação do limite de plasticidade a amostra passou pelos processos de secagem em estufa à 110°C, umedecimento cuidadoso até que ficasse moldável sem

fissuras, moldagem com movimentos regulares de vai e vem com os dedos sobre um vidro fosco até moldar um cilindro de aproximadamente 3mm de seção, em seguida pedaços centrais deste cilindro são encapsulados e pesados para determinação da umidade. A Figura 5.6 apresenta a sequência do ensaio de determinação do limite de plasticidade.

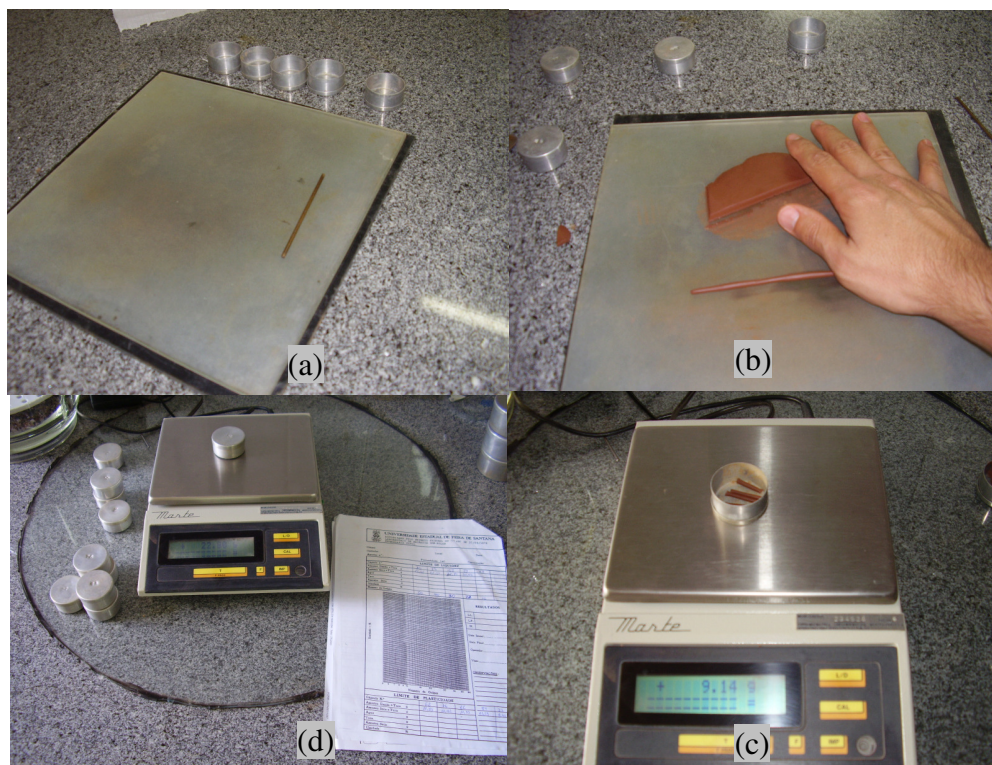


Figura 5.6 – Determinação do limite de plasticidade. (a) equipamentos; (b) moldagem do cilindro; (c) amostra para determinação da umidade; (d) pesagem de uma amostra.

Os resultados dos ensaios de determinação dos limites de Atterberg estão demonstrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Limites de Atterberg e índice de plasticidade da argila utilizada

CLASSIFICAÇÃO	FRAÇÃO (%)
Limite de liquidez (%)	45
Limite de plasticidade (%)	23
Índice de Plasticidade (%)	22

O limite de plasticidade entre 8,9% e 56,3% indica, segundo SANTOS (1975), que a argila estudada é caulínica, o que corrobora com o estudo relatado por SICM (2005) realizado na jazida onde a mesma foi extraída. A argila caulinita é, segundo VARGAS (1977), apropriada para a produção de blocos e telhas cerâmicas.

VARGAS (1977) relata que a plasticidade de um solo, segundo Atterberg, seria definida pelo índice de plasticidade que é diferença entre os limites de liquidez e plasticidade. Então, quanto maior fosse o índice de plasticidade, maior seria a plasticidade do solo. Casagrande porém, criou o Gráfico de Plasticidade de Casagrande relacionando o índice de plasticidade e o limite de liquidez, para determinação mais precisa da plasticidade do solo. A Figura 5.7 apresenta esquematicamente o Gráfico de plasticidade de Casagrande, com o ponto P definido pelo índice de plasticidade e limite de liquidez da argila utilizada neste estudo.

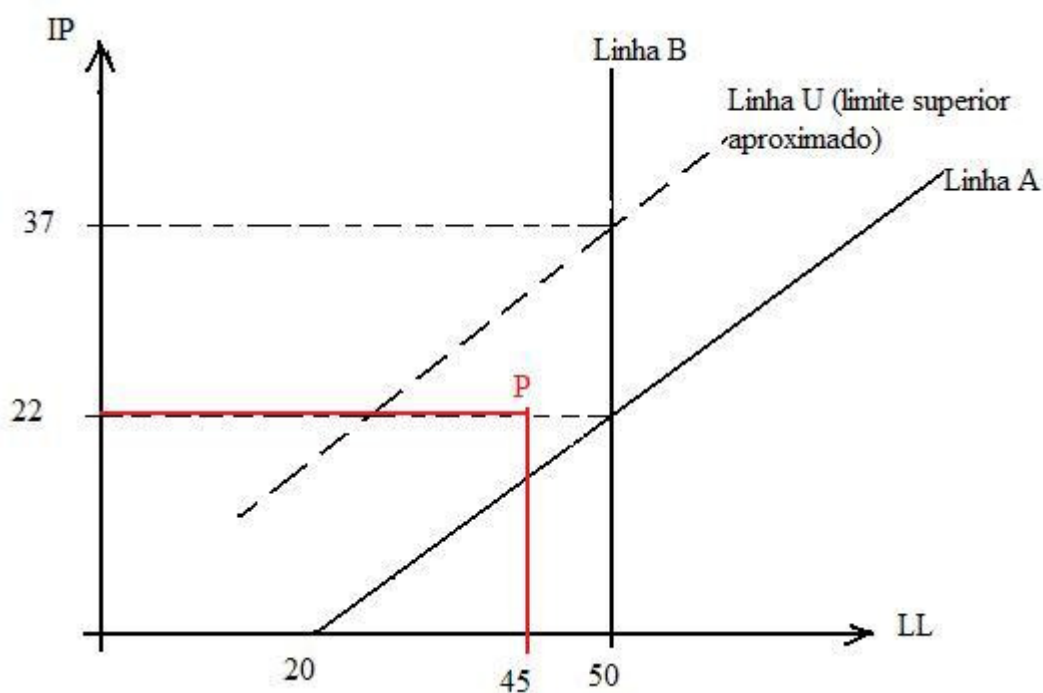


Figura 5.7 – Gráfico de plasticidade de Casagrande (VARGAS, 1977)

Pela análise da região onde o ponto P foi definido, a argila é classificada como muito plástica e pouco compressível, corroborando com a percepção e observação durante a realização dos ensaios, contrariando, entretanto, a definição do Sistema Único de Classificação de Solos (S.U.C.S) que a classificou como CL (baixa plasticidade).

5.1.1.1.3 Massa específica

Define-se como massa específica dos grãos, segundo VARGAS (1977), a relação entre a massa seca e o volume seco.

Os ensaios para determinação da massa específica dos sólidos seguiram as determinações da NBR 6508 (ABNT, 1984). Neste ensaio as amostras são secas, mede-se aproximadamente 30g de material para cada recipiente, completa-se o recipiente com água destilada, o recipiente com água mais material é pesado, levado para fervura e pesado após fervura. A Figura 5.8 apresenta a sequência de realização deste ensaio.

Para as argilas os valores de massa específica variam de 2,65 a 2,80. A massa específica da argila estudada é $2,696\text{g/cm}^3$



Figura 5.8 – Determinação da massa específica. (a) pesagem da amostra; (b) materiais; (c) amostras prontas para fervura; (d) fervura.

5.1.1.1.4 Análise química

A análise química foi realizada por efluorescência de Raios-X, para cada uma das quatro argilas que compõem o estudo.

A Tabela 5.4 apresenta o resultado da análise química realizada pela Xerox do Brasil Ltda., laboratório cadastrado no sistema da qualidade do SENAI-CETIND.

Tabela 5.4 – Resultados da análise química de argilas que compõem a jazida

Código da amostra CETIND	040308-108	040308-109	040308-110	040308-111
Código da amostra Cliente	Depósito de argila da fábrica – Argila Vermelha (Arenoso)	Depósito de argila da fábrica – Argila Cinza (Forte)	Depósito de argila da fábrica – Argila Rosa (Fraco)	Depósito de argila da fábrica – Argila Amarela (Intermediário)
Ensaio	Resultado (%)	Resultado (%)	Resultado (%)	Resultado (%)
Al ₂ O ₃	24,62	19,19	24,98	16,97
SiO ₂	62,92	43,97	50,67	47,42
Fe ₂ O ₃	7,16	12,10	9,12	15,23
MgO	ND	1,82	0,71	1,30
CaO	0,11	0,07	0,06	0,20
Na ₂ O	ND	0,11	0,09	0,11
K ₂ O	0,44	13,40	5,19	12,40
TiO ₂	1,40	0,81	0,89	0,89

(Fonte: Dados fornecidos pela cerâmica Simonassi)

A análise química mostra que para todas as argilas analisadas são altos os teores de sílica (SiO₂). Segundo NASCIMENTO (2002), a sílica provoca redução da plasticidade e da retração linear. Verifica-se que são altos também os percentuais de Fe₂O₃, responsável pela coloração avermelhada após queima. Em três amostras é alta a porcentagem de K₂O, que tem propriedades fundentes, favorecendo assim a sinterização em temperaturas mais reduzidas, assim como os demais alcalinos terrosos conforme estudos de NORTON (1973), CAMPELO et al. (2006), DUTRA et al. (2006) e SOUZA et al. (2008).

SANTOS (1975) conclui que a maior parte do alumínio (Al₂O₃) presente numa argila, está combinada, formando os argilominerais, geralmente caulinita.

5.1.2 Resíduo de gesso

A amostra do resíduo de gesso utilizada no desenvolvimento deste estudo foi coletada junto a uma empresa geradora (construtora) em Salvador. O gesso que originou o resíduo foi o gesso de revestimento de pega lenta.

A viabilidade do estudo da reutilização e reciclagem do resíduo de gesso é limitada pela necessidade de se obter este resíduo sem contaminação de outros materiais presentes nos resíduos de construção e demolição.

Segundo a RESOLUÇÃO 307 (CONAMA, 2002), os geradores de resíduos devem, sempre que possível, reutilizá-los e reciclá-los. Para tal é imprescindível que haja a segregação dos materiais nos canteiros.

Para coleta do resíduo de gesso que foi utilizado neste estudo como substituição de parte da massa cerâmica, foi solicitado ao gerador que limpasse toda a área antes da realização do serviço. A coleta aconteceu durante a execução, à medida que o resíduo caía no chão. Este procedimento propiciou que o resíduo fosse coletado sem contaminação.

Não foram realizados ensaios químicos e físicos no resíduo de gesso, pois em trabalhos como os de CARVALHO (2005) e RIBEIRO (2006) estas análises demonstraram que os resíduos quando coletados com os cuidados mencionados possuem características muito próximas as dos gessos de construção antes do uso. Estas características podem ser consultadas no item 3.4 do presente estudo.

No entanto, quando coletado, o RG estava em forma hidratada, em torrões de várias dimensões. Para poder ser utilizado o RG passou por beneficiamento, que consistiu na secagem em estufa a $110 \pm 10^{\circ}\text{C}$, por um período superior a dois dias. Em seguida foi realizada a moagem ou destorroamento, até que os grãos passassem na peneira com malha de 2,00mm.

Para que o material fosse moído tentou-se utilizar o moinho de bolas, entretanto, à medida que os grãos do RG ficavam mais finos passavam a aderir às bolas e ao recipiente. Tentou-se então promover a mistura com a argila para verificar se, além de conseguir moer, o material sairia homogeneizado. Constatou-se que houve, a impregnação das bolas e das paredes do recipiente, conforme mostrado na Figura 5.9.



Figura 5.9 – Aspecto do RG aderido às paredes do moinho

Com base nessa experiência optou-se por destorroar o RG com auxílio de martelo de madeira, sendo utilizado no experimento apenas o material passante na peneira de malha 2,0mm.

5.1.2.1 Preparação da massa de argila com RG incorporado

A preparação da massa foi precedida pelo beneficiamento da argila, que consistiu em reduzir ou moer a argila até que seus grãos passassem na peneira de malha 0,071 mm. Esta dimensão dos grãos é a mais adequada para conformação pelo método de extrusão.

Verificou-se que na maioria da bibliografia especializada, o teor máximo de resíduos incorporados na argila é da ordem de 30%. Entretanto, como o RG tem característica não plástica, optou-se por realizar a primeira mistura com 20% de substituição de argila por RG e verificar a possibilidade de moldagem por extrusão. Constatou-se que é possível a moldagem.

As massas cerâmicas foram então formuladas por misturas com teores de 10%, 15% e 20% de substituição da massa de argila por RG, além da massa de argila sem resíduo, como referência.

Foram pesados então 10; 9; 8,5 e 8 kg de argila para ser misturado com 0; 1; 1,5 e 2,0 kg de RG, respectivamente. Após mistura manual agitando-se a mistura em sacos plásticos por no mínimo dois minutos, adicionou-se água misturando

manualmente (Figura 5.10). Foram utilizados 2.600ml de água para a massa de argila sem RG. Constatou-se a necessidade de maior quantidade de água para conformação dos corpos-de-prova com RG, à medida que a quantidade do resíduo aumenta, sendo de 2.950ml para a massa com 20% de RG. Após mistura e umedecimento, as amostras de massa foram passadas três vezes na extrusora para que se obtivesse homogeneização ainda maior e assim poderem ser conformadas.



Figura 5.10 – Mistura com adição de água.

5.1.2.2 Conformação e identificação dos corpos-de-prova

Após determinação dos quatro teores da massa de argila foram produzidos, por extrusão a vácuo com pressão de 660mmHg, os corpos-de-prova com dimensões 120x30x20mm. As Figuras 5.11 e 5.12, apresentam, respectivamente, os corpos-de-prova sendo conformados por extrusão e depois de conformados, recebendo a marcação de gabarito de 100mm para medição da retração na secagem e queima.

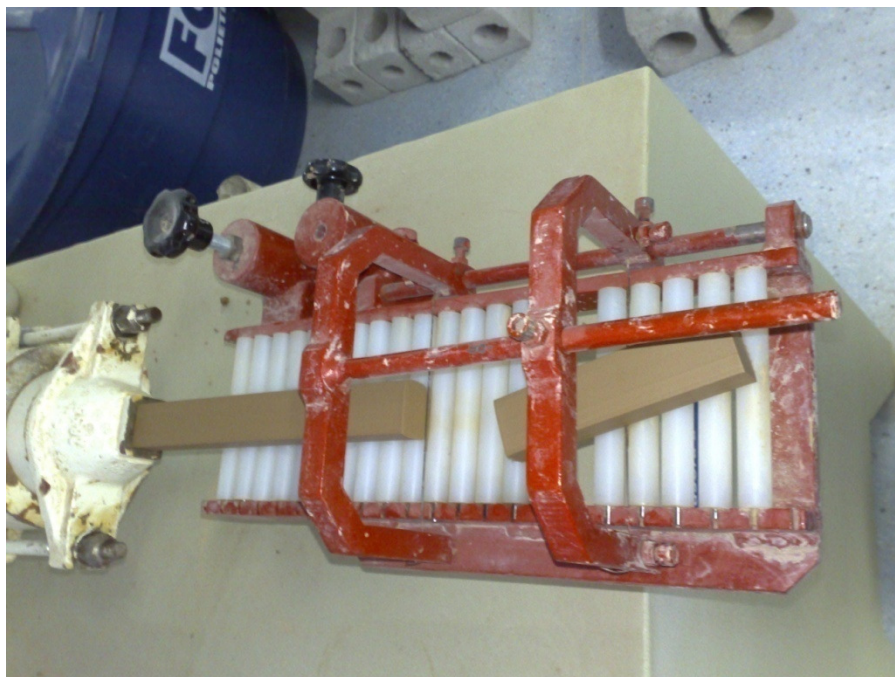


Figura 5.11 – Conformação dos corpos-de-prova



Figura 5.12 – Marcação com gabarito dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram identificados conforme demonstrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.5 – Identificação dos corpos-de-prova.

IDENTIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO
M_{00} , M_{10} , M_{15} e M_{20}	Representam respectivamente os percentuais 0, 10, 15 e 20% de substituição da massa de argila por RG
M_x 800, 900 e 1000	Representam respectivamente as temperaturas de queima dos CPs

Por exemplo, o corpo-de-prova $M_{15}900$, significa que a massa tem 15% de resíduo e que foi queimado na temperatura de 900°C.

5.1.2.3 Secagem e queima dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova cerâmicos, após conformados, foram postos em bandejas e cobertos com panos ligeiramente úmidos para evitar perda de água muito rápida durante a secagem ao ar livre, pois esta perda de água poderia gerar fissuras devido a retração dos CPs. A secagem foi realizada por uma semana.

Após secagem ao ar livre, os corpos-de-prova foram encaminhados para secagem a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, em estufa com faixa de 50 à 300°C, até constância de massa. A Figura 5.13 apresenta a estufa utilizada.



Figura 5.13 – Estufa para secagem (Laboratório de cerâmica do SENAI-BA)

Após a secagem na estufa e verificadas as retrações na secagem, os CPs foram encaminhados para queima em forno elétrico nas temperaturas de 800, 900, 1000°C. A taxa de aquecimento foi fixada em 200°C/hora. O tempo de residência (patamar) das amostras no forno foi de 2 horas após alcançada a temperatura final de queima. O resfriamento iniciou-se após período de patamar, sendo mantidas as amostras no forno desligado, até atingir a temperatura ambiente.

Foram produzidos 40 corpos-de-prova para cada teor de mistura.

O forno utilizado no estudo foi do tipo mufla, com faixa de temperatura de até 1300°C. Este tipo de forno é geralmente utilizado em laboratórios para sinterização e queima de corpos-de-prova cerâmicos. A Figura 5.14 mostra o forno com os CPs após queima.



Figura 5.14 – Forno tipo mufla com os CPs (Laboratório de cerâmica do SENAI-BA)

5.1.2.4 Propriedades e ensaios realizados

As propriedades cerâmicas avaliadas foram: retração linear de secagem e após queima, porosidade aparente, absorção de água, módulo de resistência à flexão, perda de massa ao fogo e cor.

5.1.2.4.1 Retração linear de secagem e após queima

A retração linear de secagem e após queima foi realizada seguindo o Método EN 020 CON, utilizado no laboratório de cerâmica vermelha do SENAI-BA. O ensaio consiste na determinação do comprimento dos CPs antes e após cada secagem e queima. O resultado é dado pela expressão:

$$RL (\%) = \frac{L_i - L_f}{L_f} \times 100$$

Onde,

RL (%) = retração linear em percentual;

L_i = comprimento inicial do CP (mm);

L_f = comprimento final do CP (mm), após secagem ou queima.

5.1.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado seguindo os preceitos da NBR 15270 (ABNT, 2005) que é utilizada para este ensaio em blocos cerâmicos. O ensaio consiste na determinação das massas seca, úmida e submersa com a absorção dada pela expressão:

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100$$

Onde,

AA (%) = absorção de água em percentual;

M_u = massa úmida do CP (g);

M_s = massa seca do CP (g), após secagem em estufa.

5.1.4 Porosidade aparente

O ensaio de porosidade aparente foi realizado seguindo os preceitos da NBR 6220 (ABNT, 1997). O ensaio consiste na determinação das massas úmida, seca e imersa dos CPs após queima:

$$PA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100$$

Onde,

PA (%) = porosidade aparente em percentual;

M_u = massa úmida do CP (g);

M_s = massa seca do CP (g), após secagem em estufa.

M_i = massa imersa do CP (g), obtida por balança hidrostática;

5.1.5 Perda de massa ao fogo

O ensaio de perda de massa foi realizado seguindo Método EN 021 CON, utilizado no laboratório de cerâmica vermelha do SENAI-BA. O ensaio consiste na determinação da massa seca dos CPs após secagem e após a queima:

$$PMF (\%) = \frac{M_s - M_q}{M_s} \times 100$$

Onde,

PA (%) = porosidade aparente em percentual;

M_s = massa seca do CP (g), após secagem em estufa.

M_q = massa do CP (g), após queima.

5.1.6 Módulo de resistência à flexão

Os ensaios de resistência à flexão de três pontos foram realizados numa máquina universal de ensaios EMIC DL 20 – Range: 0 – 20 toneladas. Esta máquina está apresentada na Figura 5.15 e é geralmente utilizada para realização de ensaios de módulo ou resistência à flexão, para determinação da resistência mecânica em telhas e placas cerâmicas para revestimentos.



Figura 5.15 – Máquina universal de ensaios (Laboratório de cerâmica do SENAI-BA)

A metodologia utilizada nos ensaios de módulo de resistência à flexão está descrita na norma NBR 13818 (ABNT, 1997). O método é o de flexão em três pontos, utilizando a distância entre os apoios de 80mm com carregamento no eixo. A velocidade de carregamento foi de 5mm por minuto. A Figura 5.16, mostra um CP pronto para o ensaio.

A determinação do módulo de resistência à flexão em MPa foi obtido com a utilização da fórmula:

$$MRF (MPa) = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times e^2}$$

Onde,

MRF (MPa) = módulo de resistência à flexão;

F = carga (N);

L = Distância entre os apoios (mm);

b = largura (mm) da seção transversal do CP;

e = espessura (mm) da seção transversal do CP.

5.1.7 Análise de cor

Segundo MOTTA et al. (2001), é a coloração avermelhada dos produtos como blocos, telhas, lajotas, tubos, entre outros, devido a presença de óxidos de ferro em teores que podem superar 4% – que caracterizam o seguimento como sendo indústria de cerâmica vermelha.

SANTOS (1989) completa que as argilas para produção destes materiais devem ter como desejáveis entre outras propriedades, a coloração avermelhada após a queima em temperaturas razoavelmente baixas (950°C – temperatura usual de queima para essa aplicação).

É evidente que a cor é uma característica inerente ao tipo de cerâmica estudada neste trabalho. A cor dos corpos-de-prova após secagem a 110°C e queima nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C, foi avaliada por comparação com o CECOR – Catálogo de 2.400 cores Standards. Esta metodologia é utilizada atualmente para determinação das cores nos materiais cerâmicos, avaliados no SENAI-BA – Dendezeiros – Laboratório de Cerâmica Vermelha. A Figura 5.16, mostra fotos da análise por comparação da cor das amostras.

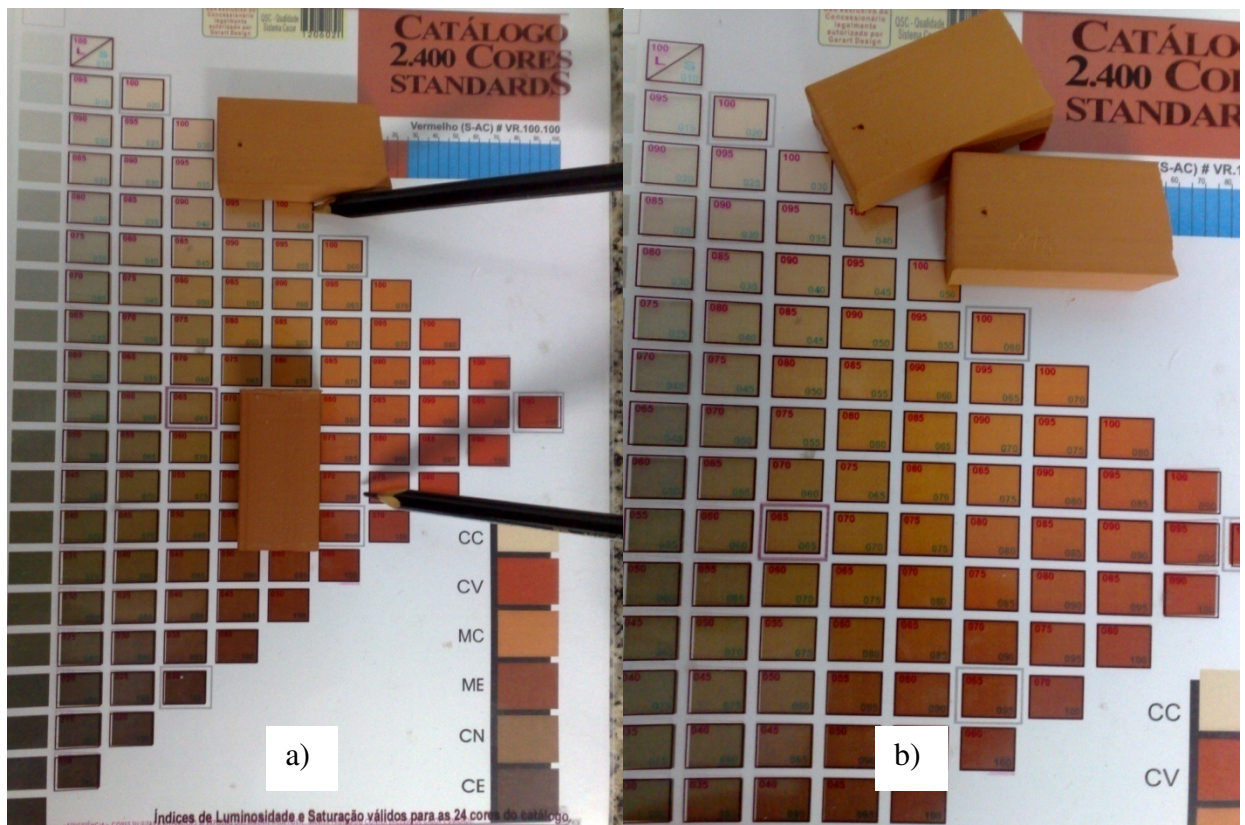


Figura 5.16 – Avaliação da cor em corpos-de-prova cerâmicos: a) CPs queimados a 1000°C e b) CPs queimados a 900°C

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentados, a seguir, os resultados e análises dos ensaios realizados no programa experimental, para avaliação da influência da utilização do resíduo de gesso em substituição a parte da massa de argila utilizada na produção de blocos e telhas de cerâmica vermelha. Serão discutidas as seguintes propriedades: retração linear, porosidade aparente, absorção de água, módulo de resistência à flexão, perda de massa ao fogo e cor após secagem e queima.

Os resultados dos ensaios foram analisados com base na análise estatística, para respaldar as conclusões obtidas. A análise foi feita para cada tipo de ensaio, com o objetivo de comprovar estatisticamente a influência das variáveis investigadas, bem como a existência de possíveis interações entre estas variáveis. Foi verificada a significância estatística do efeito de cada um das variáveis através da análise de variância (ANOVA). Esta técnica permite comparar grupos de observações, através da comparação da variabilidade das médias entre grupos e a variabilidade das observações dentro de cada grupo (NANNI e RIBEIRO apud MOURA, 2000). O efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta analisada é determinado através de um teste de comparação entre valores calculados ($F_{\text{calculado}}$) e os tabelados (F_{tabelado}) de uma função de distribuição de probabilidade de Fisher. Os valores de (F_{tabelado}) são estabelecidos para um determinado nível de significância. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se ($F_{\text{calculado}}$) for maior do que (F_{tabelado}). O nível de significância adotado nas análises foi de 5%, que é comumente utilizado na área de engenharia civil.

As variáveis independentes definidas para o estudo foram:

1. Temperatura de Queima em 3 níveis (800, 900 e 1000°C);
2. Teor de RG em 3 níveis (0, 10 e 15%).

Não foi possível avaliar o desempenho das massas cerâmicas com 20% de RG, queimadas nas temperaturas de 900 e 1000°C em relação às propriedades mencionadas anteriormente, exceto retração linear para a temperatura de 900°C. Durante a queima a essas temperaturas, as amostras entraram em colapso ou fissuraram bastante e essas fissuras poderiam distorcer os resultados obtidos. Este fato pode ser explicado por algumas transformações térmicas que ocorrem nas massas cerâmicas ou materiais

constituintes da mesma durante a queima. Alguns autores chamam a atenção para este fato como comentado a seguir.

De acordo com NORTON (1973), uma transformação é a mudança na forma cristalina da anidrita II (ortorrômbica) em anidrita I (cúbica) que ocorre em temperaturas superiores a 800°C. Ainda segundo este pesquisador, esta transformação pode gerar retração ou dilatação, que ocorre quando um mineral se decompõe ou sofre uma inversão em outra forma cristalina. A Figura 6.1 apresenta a análise térmica de um resíduo de gesso estudado por SILVA et al. (2006), na qual a letra “b” representa o pico exotérmico (liberação de calor) em que acontece a transformação das anidritas.

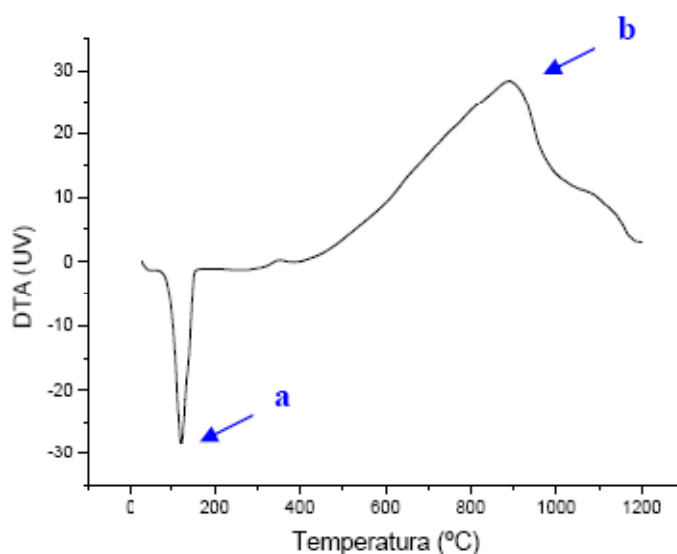


Figura 6.1 – DTA do rejeito de gesso de construção reciclado (SILVA et al, 2006)

Outra transformação que ocorre em temperaturas em torno de 900°C (temperatura usual de queima) é a vitrificação. A vitrificação é a formação de líquido vítreo que flui e preenche parte do volume dos poros. A temperatura de formação desta fase vítrea pode ser reduzida na presença de fundentes como o feldspato, formado principalmente por K^+ , Na^+ e Ca^{2+} (CALLISTER, 2002). O feldspato já é encontrado nas massas cerâmicas e com o acréscimo do Ca^{2+} presente no RG, pode ter reduzido ainda mais o ponto de fusão, propiciando a vitrificação em temperaturas menores. Segundo CALLISTER (2002), a vitrificação completa pode ser evitada durante a queima, pois o corpo cerâmico se torna mole e irá eventualmente colapsar. Outros autores, a exemplo de NORTON (1973), CAMPELO et al. (2006), DUTRA et al.

(2006) e SOUZA et al. (2008), também destacam os óxidos formados com os alcalinos terrosos Na, K e Ca como substâncias fundentes.

Efeitos endotérmicos da caulinita, ilita e nontronita ocorrem entre 500 e 600°C, enquanto que a cristalização exotérmica acontece entre 900 e 1000°C (NOYES PUBLICATIONS, 2002 apud JOHN e CINCOTTO, 2003). Estas transformações de fase também podem ser aceleradas pela presença de Ca. Ocorrem com retração da ordem de 6% (NORTON, 1973). Isso pode justificar o colapso das amostras.

6.1 RETRAÇÃO LINEAR DE SECAGEM E APÓS QUEIMA

Embora nos materiais cerâmicos a retração ocorra nas três direções, retração linear (maior dimensão) é a que a caracteriza.

A retração linear ocorre para a maioria das argilas ou massas cerâmicas, devido a tensões superficiais que causam o fechamento dos poros aproximando as partículas entre si, devido a saída da água da mistura (NORTON, 1973).

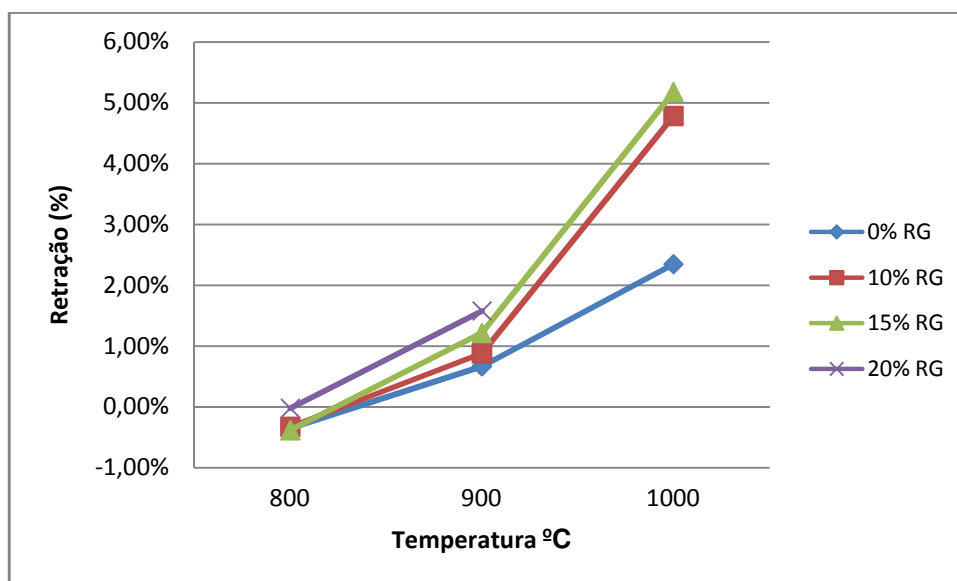
O cálculo da retração linear correspondente a 110°C foi realizado em comparação ao estado cru (saída da maromba). Essa retração é bastante pronunciada e corresponde a perda da água utilizada para conformação (secagem ao ar) e água presente nos poros (secagem em estufa a 110°C). Para as temperaturas de queima 800°C, 900°C e 1000°C o cálculo foi realizado comparando a retração de queima de cada amostra com a retração a 110°C.

Os resultados do ensaio de retração linear para as temperaturas de secagem e de queima estão apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Retração linear de secagem e após queima

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)				
	110	800	900	1000	
M₀₀	Retração Média (%)	5,72	-0,30	0,70	2,44
	Desvio padrão	0,11	0,20	0,12	0,00
	Coef. de variação	1,92	66,67	17,14	0,00
M₁₀	Retração Média (%)	6,02	-0,30	0,85	4,78
	Desvio padrão	0,08	0,12	0,13	0,07
	Coef. de variação	1,33	40,00	15,29	1,46
M₁₅	Retração Média (%)	6,40	-0,40	1,24	5,23
	Desvio padrão	0,00	0,05	0,09	0,13
	Coef. de variação	0,00	12,50	7,26	2,49
M₂₀	Retração Média (%)	6,26	0,11	1,58	-
	Desvio padrão	0,15	0,11	0,09	-
	Coef. de variação	2,40	100,00	5,70	-

A Figura 6.2 apresenta graficamente o comportamento quanto à retração linear para cada uma das massas cerâmicas, nas diferentes temperaturas de secagem e de queima estudadas.

**Figura 6.2** – Comportamento da retração linear das massas cerâmicas em função da temperatura de queima

Por meio da ANOVA foi avaliada a influência da temperatura o do teor de RG sobre a retração linear. A tabela 6.2 mostra os resultados desta análise.

Tabela 6.2 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando na retração linear

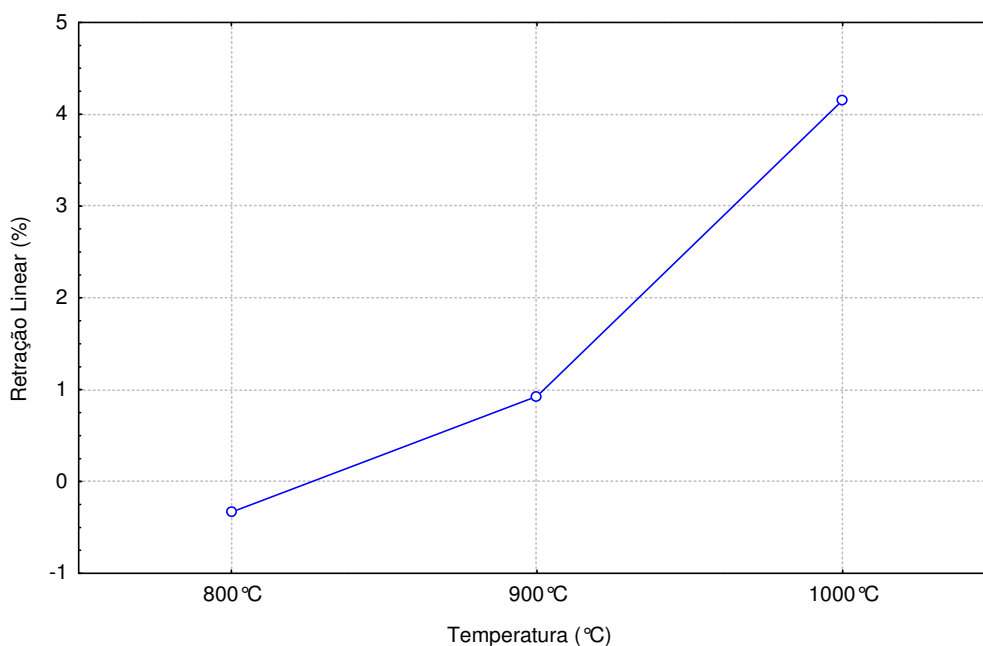
Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1- Temperatura	2	80,2453	5999,3999	3,270	S
2- Teor	2	4,7548	355,4828	3,270	S
3- 12	4	3,4512	258,0264	2,640	S
ERRO	36	0,0134			

GDL – Graus de liberdade
 MQ – Média quadrada
 Fcalc – Valor calculado de F

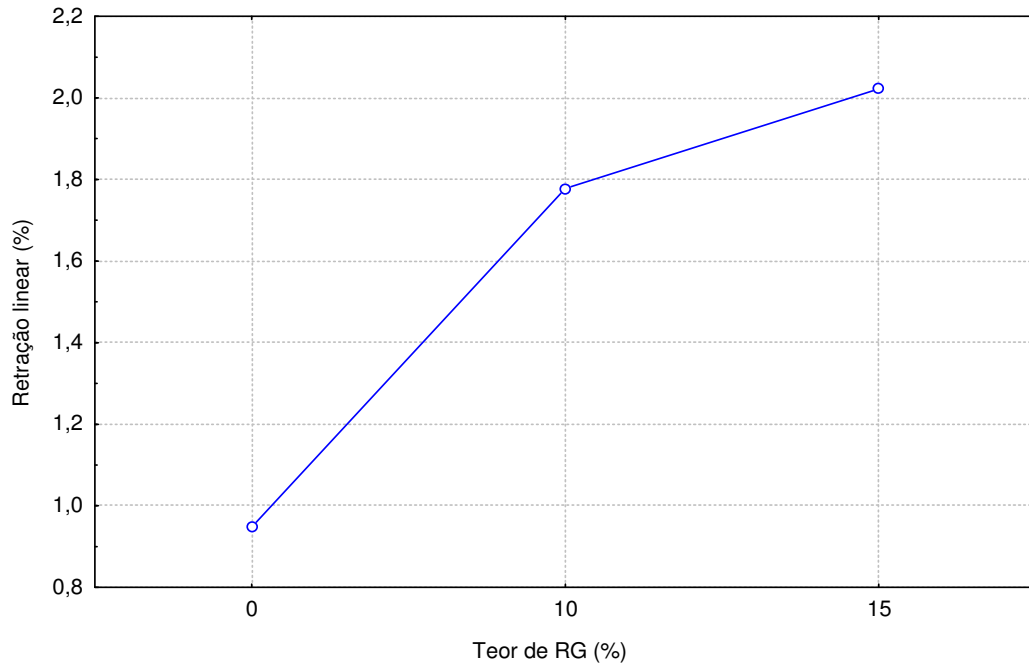
F0,05 – Valor tabelado de F para 5%
 S - Significativo
 NS – Não significativo

Verifica-se através da ANOVA que é significativa a influência da temperatura, do teor de RG e da interação entre estes dois fatores nos resultados de retração linear das massas cerâmicas.

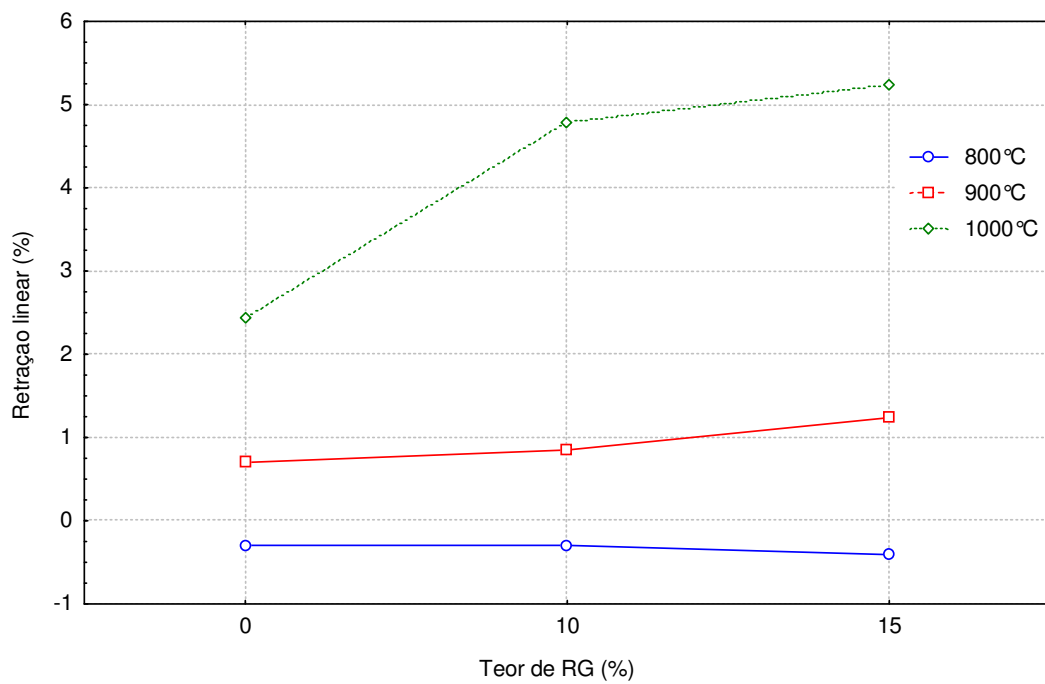
Com base na ANOVA, para se ter um melhor entendimento do comportamento das massas cerâmicas foram traçados os gráficos dos efeitos (temperatura e teor do RG) e da interação entre temperatura e teor de RG em função da retração linear, conforme apresentados na Figura 6.3 (a),(b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 6.3 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto a retração linear em função: (a) temperatura; (b) teor de RG; (c) interação dos fatores: temperatura e teor de RG.

Observa-se que na secagem quanto maior o teor de RG maior a retração linear.

Com base na ANOVA verifica-se que quanto maior a temperatura maior a retração linear. Bem como, quanto maior o teor de RG maior a retração linear.

Os valores encontrados apontaram uma pequena expansão para as amostras queimadas a 800°C para os teores de 10 e 15% de substituição de argila por RG. Este comportamento indica que não houve sinterização do material, que geralmente ocorre em temperaturas superiores a essa.

Observa-se que à medida que aumenta o percentual de substituição de argila por RG aumenta a retração linear para as temperaturas 110°C (secagem), 900°C e 1000°C(queima). Este acréscimo na retração pode ser explicado tanto pela hidratação do gesso que consome água da mistura em temperatura ambiente (CANUT, 2006), como também pelo aumento do grau de sinterização devido às características fundentes do cálcio presente no RG.

6.2 POROSIDADE APARENTE

A porosidade é um indicador muito importante para um material cerâmico, uma vez que, serve como medida para o seu grau de maturação ou sinterização (NORTON, 1973).

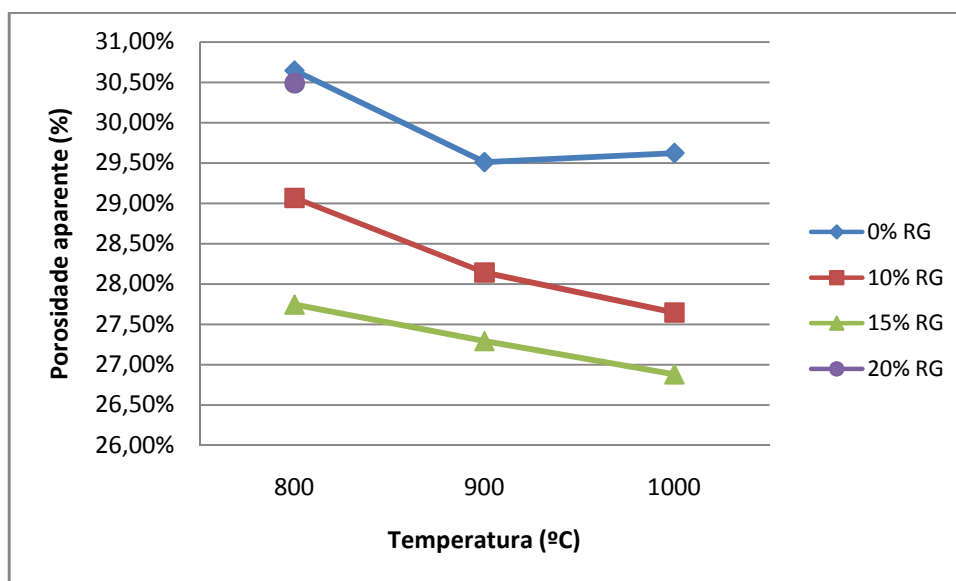
Qualquer porosidade residual no material cerâmico representará influência negativa tanto nas propriedades elásticas como na resistência (CALLISTER, 2002).

A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos da porosidade aparente em função dos teores de substituição de argila por RG e das temperaturas de queima.

Tabela 6.3 – Porosidade aparente dos corpos-de-prova queimados

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)			
	800	900	1000	
M₀₀	P. A. Média (%)	30,64	29,51	29,62
	Desvio padrão	0,79	0,61	0,62
	Coef. de variação	2,58	2,07	2,09
M₁₀	P. A. Média (%)	29,07	28,14	27,65
	Desvio padrão	0,22	0,14	0,16
	Coef. de variação	0,76	0,50	0,59
M₁₅	P. A. Média (%)	27,75	27,29	26,88
	Desvio padrão	0,08	0,09	0,12
	Coef. de variação	0,29	0,33	0,45
M₂₀	P. A. Média (%)	30,49	-	-
	Desvio padrão	0,18	-	-
	Coef. de variação	0,59	-	-

A Figura 6.4 mostra a representação gráfica do comportamento da porosidade aparente das massas cerâmicas analisadas em função das temperaturas de queima estudadas.

**Figura 6.4** – Comportamento da porosidade aparente das massas cerâmicas em função da temperatura de queima

Utilizou-se a ANOVA para avaliar a influência da temperatura e o do teor de RG sobre a porosidade aparente. A Tabela 6.4 mostra os resultados desta análise.

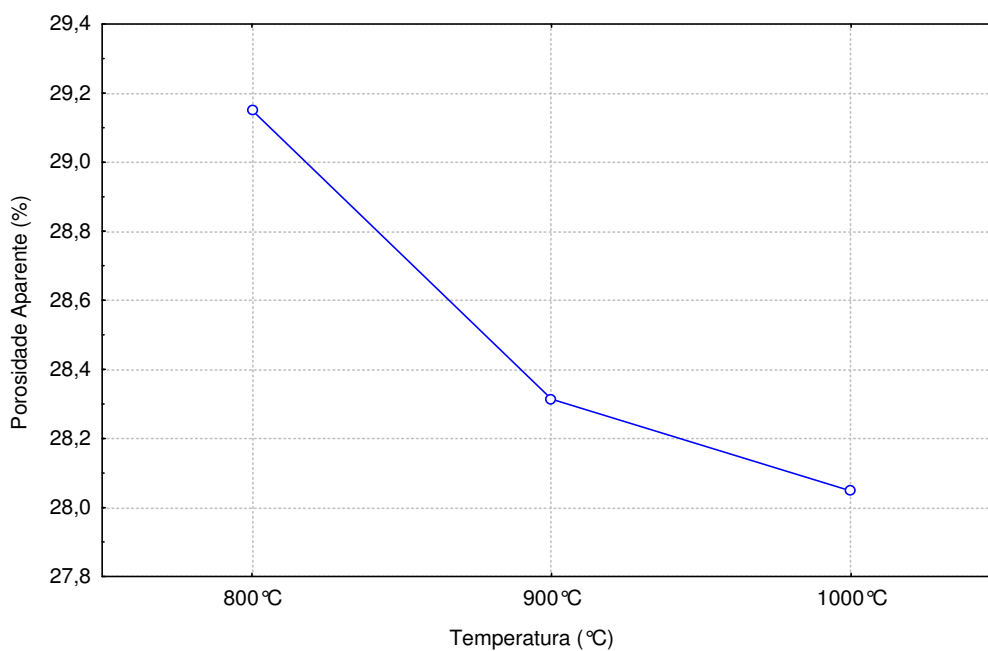
Tabela 6.4 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando na porosidade aparente

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1- Temperatura	2	4,9666	29,6138	3,270	S
2- Teor	2	26,2904	156,7590	3,270	S
3- 12	4	0,2587	1,5426	2,640	N
ERRO	36	0,1677			

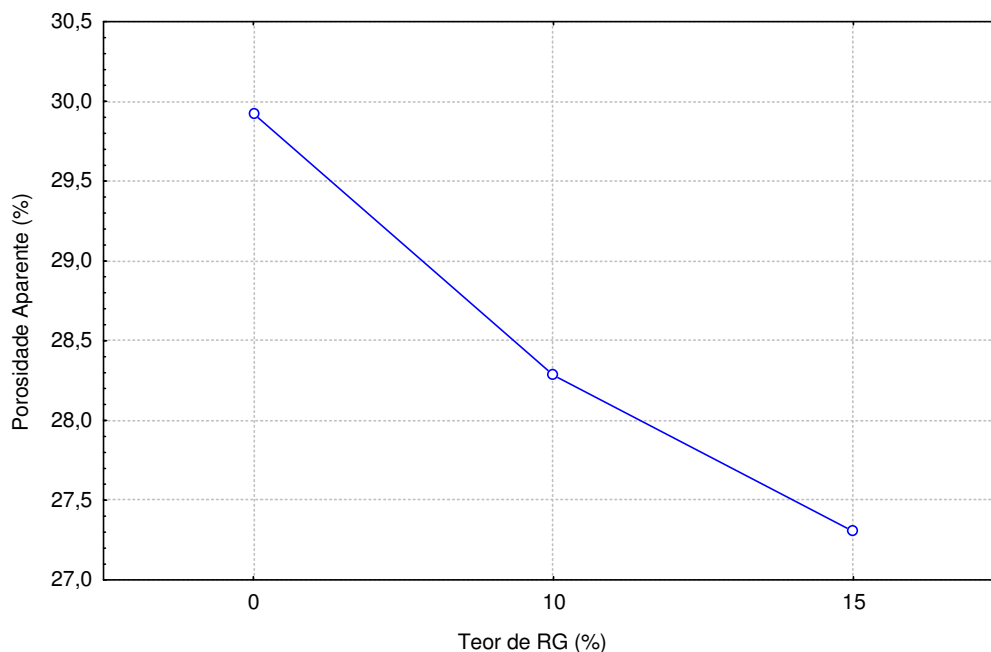
GDL – Graus de liberdade
 MQ – Média quadrada
 Fcalc – Valor calculado de F
 F0,05 – Valor tabelado de F para 5%
 S - Significativo
 NS – Não significativo

Verifica-se através da ANOVA que é significativa a influência da temperatura de queima e do teor de RG nos resultados de porosidade aparente das massas cerâmicas. Por outro lado, não houve interação entre estes dois fatores.

Com base na ANOVA, para se ter um melhor entendimento do comportamento das massas cerâmicas foram traçados os gráficos dos efeitos (temperatura e teor do RG) em função da porosidade aparente, conforme estão apresentados na Figura 6.5 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 6.5 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto a porosidade aparente em função: (a) temperatura; (b) teor de RG

Os resultados demonstram, com base na ANOVA, que houve redução da porosidade aparente à medida que se aumenta a temperatura de queima e o percentual de substituição da argila por RG. Este comportamento corrobora com as análises realizadas para retração linear e pode ser justificado pelo maior grau de sinterização das massas cerâmicas.

Segundo SILVA et al. (2006), que também avaliaram a influência de resíduos de gesso nas propriedades de cerâmicas vermelhas, a porosidade aparente e a absorção de água estão interligadas ao comportamento da retração linear. À medida que a retração aumenta, a absorção e a porosidade reduzem.

Para materiais cerâmicos extrudados referenciados, os valores de porosidade aparente publicados por SANTOS (1989) são 27,9 e 30,7% para temperaturas de queima de 950 e 1050°C, respectivamente. SILVA et al. (2006) apresentaram resultados com porosidade variando de 33% para 850°C a 26% para 1050°C de temperaturas de queima. No presente estudo a massa cerâmica com 15% de RG apresentou melhor comportamento quanto à porosidade aparente com valores inferiores aos encontrados por esses autores.

6.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água está associada à porosidade aberta dos materiais cerâmicos. Quanto maior a absorção de um material maior será a sua porosidade aberta e, conseqüentemente, menos resistentes serão estes materiais.

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos da absorção de água em função dos teores de substituição de argila por RG nas temperaturas de queima estudadas.

Tabela 6.5 – Absorção de água dos corpos-de-prova queimados

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)			
	800	900	1000	
M₀₀	A. A. Média (%)	16,94	14,18	10,63
	Desvio padrão	0,49	0,07	0,08
	Coef. de variação	2,89	0,49	0,75
M₁₀	A. A. Média (%)	15,65	13,02	5,90
	Desvio padrão	0,11	0,11	0,10
	Coef. de variação	0,70	0,84	1,69
M₁₅	A. A. Média (%)	14,83	12,14	4,84
	Desvio padrão	0,05	0,06	0,15
	Coef. de variação	0,34	0,49	3,10
M₂₀	A. A. Média (%)	16,39	-	-
	Desvio padrão	0,12	-	-
	Coef. de variação	0,73	-	-

A Figura 6.6 apresenta o comportamento das massas cerâmicas quanto à absorção de água para as temperaturas de queima estudadas.

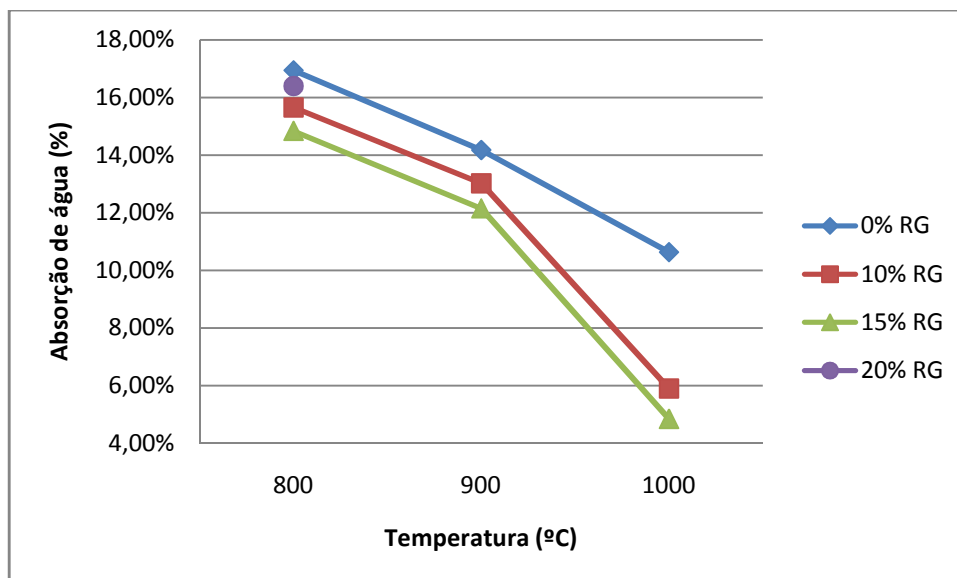


Figura 6.6 – Comportamento da absorção de água das massas cerâmicas em função da temperatura de queima

Por meio da ANOVA foi avaliada a influência da temperatura de queima, do teor de RG e da interação entre estes fatores sobre a absorção de água. A Tabela 6.6 mostra os resultados desta análise.

Tabela 6.6 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando na absorção de água

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1- Temperatura	2	296,7480	8500,6550	3,270	S
2- Teor	2	43,9240	1258,2620	3,270	S
3- 12	4	7,2960	209,0177	2,640	S
ERRO	36	0,0349			

GDL – Graus de liberdade

MQ – Média quadrada

Fcalc – Valor calculado de F

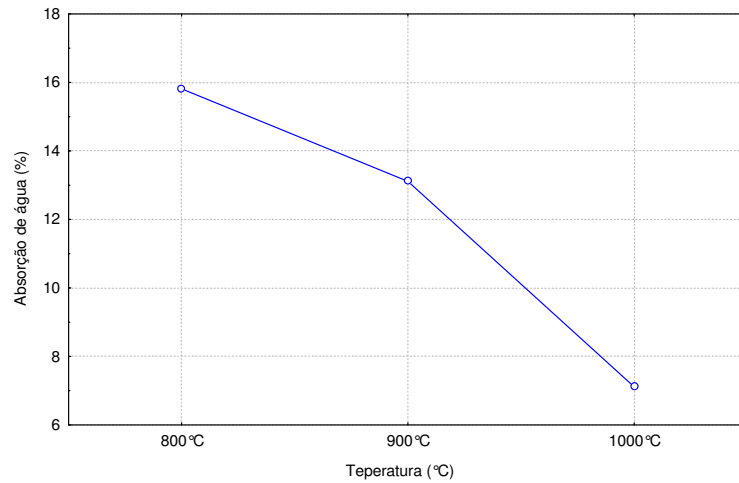
F0,05 – Valor tabelado de F para 5%

S - Significativo

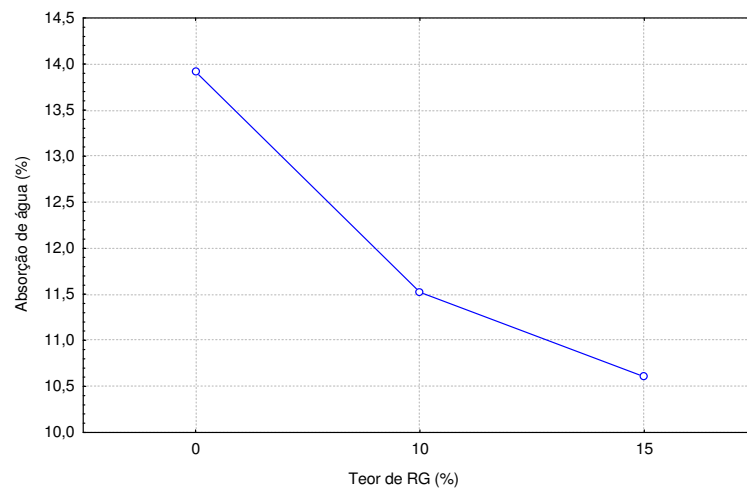
NS – Não significativo

Verifica-se através da ANOVA que é significativa a influência da temperatura, do teor de RG e da interação entre estes dois fatores nos resultados de absorção de água das massas cerâmicas.

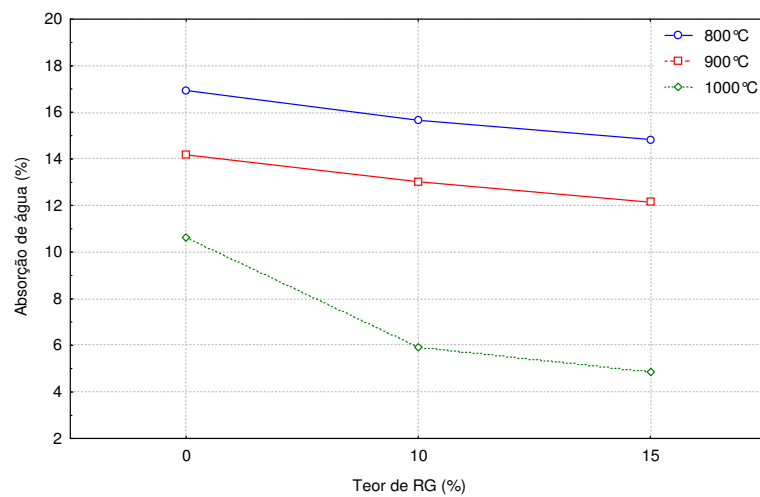
Com base na ANOVA, para se ter um melhor entendimento do comportamento das massas cerâmicas, foram traçados os gráficos dos efeitos (temperatura e teor do RG) e da interação entre temperatura e teor de RG em função da absorção de água, conforme estão apresentados na Figura 6.7 (a),(b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 6.7 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto à absorção de água em função: (a) temperatura; (b) teor de RG; (c) interação dos fatores: temperatura e teor de RG

Pode-se observar, com base na análise de variância, que quanto maior a temperatura menor a absorção de água das massas cerâmicas. Verifica-se também que quanto maior o teor de RG menor a absorção de água, para todas as temperaturas de queima.

Este comportamento é coerente com o observado para absorção de água, porosidade aparente, e retração linear.

De acordo com DONDI (2006), a faixa ótima geralmente aceita na prática industrial para absorção de água de blocos e telhas cerâmicas é de 12% a 24%. SANTOS (1989) encontrou na sua pesquisa valores de absorção de 14,5 e 16,2% para as temperaturas de 950 e 1050°C, respectivamente.

A massa cerâmica com 15% de RG foi a que apresentou o melhor comportamento quanto à absorção de água para produção de telhas que segundo a NBR 15310 (ABNT, 2005) deve ter absorção inferior a 20%. Para a produção de blocos cerâmicos, a NBR 15270 (ABNT, 2005) estabelece que a absorção deve ser entre 8% e 25%, portanto a temperatura de queima para produção de blocos com resíduo de gesso deve ser limitada a 900°C.

6.4 MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O módulo de resistência à flexão varia em função da distribuição granulométrica e da composição mineralógica das argilas. Segundo CALLISTER (2002), quanto maior o tamanho da peça maior a possibilidade de falhas e consequentemente menor a resistência à flexão. Porém amostras com diferentes dimensões e mesma massa tendem a ter mesmo módulo de resistência.

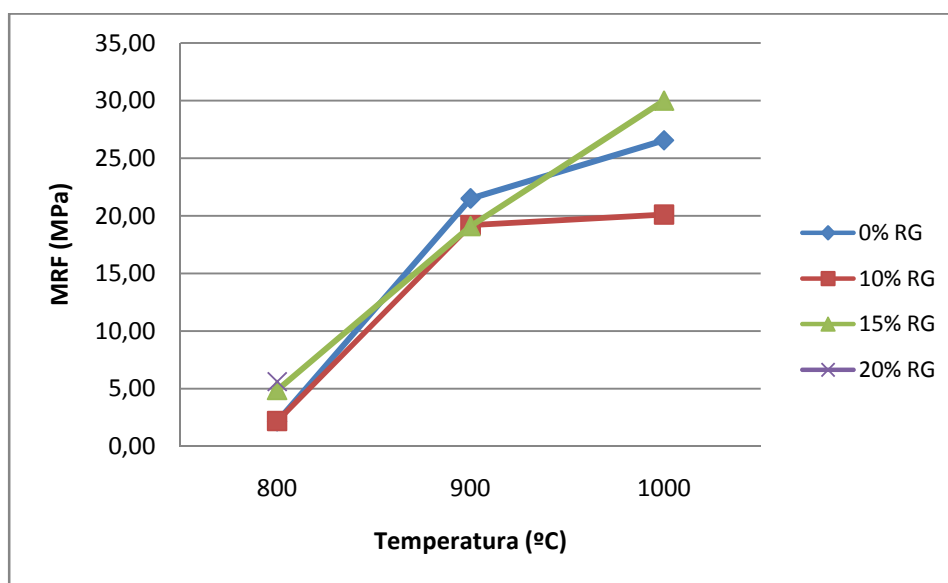
O módulo de resistência à flexão (MRF) é muito importante também no estado cru (seco a 110°C) devido ao manuseio durante as atividades de transporte e armazenamento, antes da queima. Tanto na secagem quanto na queima dentro dos fornos.

A Tabela 6.7 apresenta os resultados obtidos para o módulo de resistência à flexão, em função dos teores de substituição de argila por RG para as temperaturas de queima estudadas.

Tabela 6.7 – Módulo de resistência à flexão dos corpos-de-prova após secagem e queima

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)				
	110	800	900	1000	
M₀₀	MRF Média (MPa)	5,89	2,15	21,49	26,53
	Desvio padrão	0,44	0,80	1,18	0,80
	Coef. de variação	7,47	37,21	5,49	3,02
M₁₀	MRF Média (MPa)	6,88	2,18	19,19	20,10
	Desvio padrão	0,56	1,26	1,10	0,70
	Coef. de variação	8,13	57,80	5,73	3,48
M₁₅	MRF Média (MPa)	7,11	4,88	19,10	29,98
	Desvio padrão	0,18	0,53	0,95	1,89
	Coef. de variância	2,53	10,86	4,97	6,30
M₂₀	MRF Média (MPa)	7,29	5,60	-	-
	Desvio padrão	0,43	0,26	-	-
	Coef. de variação	5,90	4,64	-	-

A Figura 6.8 apresenta o comportamento do MRF em função das temperaturas de secagem e de queima estudadas.

**Figura 6.8** – Comportamento do MRF das massas cerâmicas em função da temperatura de queima

Por meio da ANOVA foi avaliada a influência da temperatura de queima e do teor de RG, bem como, da interação entre estes dois fatores sobre o MRF. A Tabela 6.8 mostra os resultados desta análise.

Tabela 6.8 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando no MRF

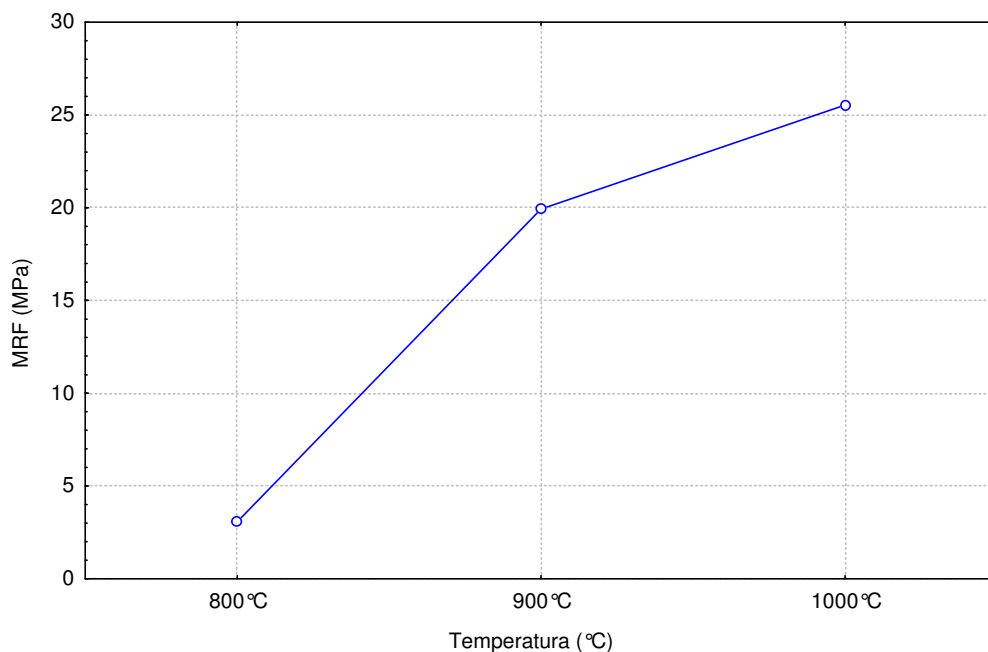
Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1- Temperatura	2	2050,8325	1723,1006	3,270	S
2- Teor	2	68,4174	57,4840	3,270	S
3- 12	4	39,4268	33,1262	2,640	S
ERRO	36	1,1902			

GDL – Graus de liberdade
 MQ – Média quadrada
 Fcalc – Valor calculado de F

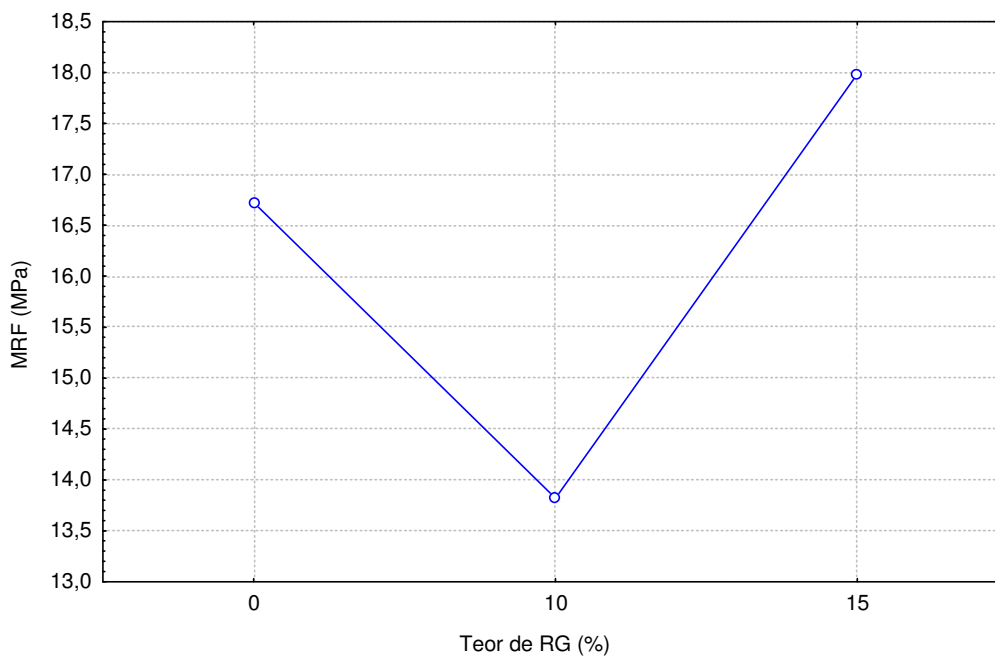
F0,05 – Valor tabelado de F para 5%
 S - Significativo
 NS – Não significativo

Através da ANOVA verifica-se que é significativa a influência da temperatura de queima, do teor de RG e da interação entre estes dois fatores nos resultados de módulo de resistência à flexão das massas cerâmicas.

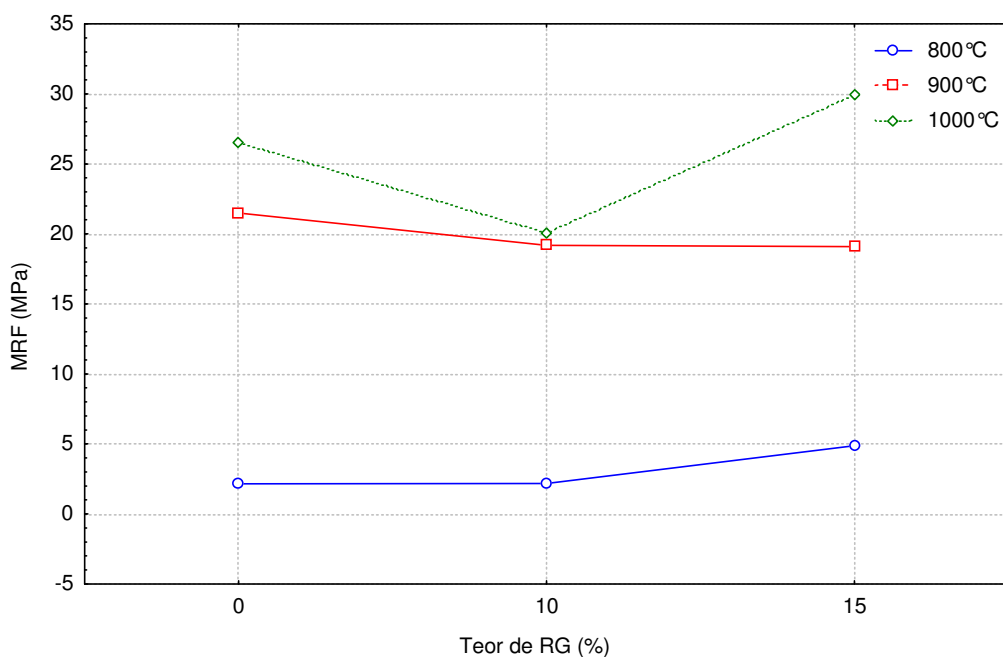
Com base na ANOVA, para se ter um melhor entendimento do comportamento das massas cerâmicas, foram traçados os gráficos dos efeitos (temperatura e teor do RG) e da interação entre temperatura e teor de RG em função do módulo de resistência à flexão, conforme estão apresentados na Figura 6.9 (a),(b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 6.9 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto ao MRF em função: (a) temperatura; (b) teor de RG; (c) interação dos fatores: temperatura e teor de RG.

De acordo com DONDI (2006) a faixa de variação do módulo de resistência à flexão considerada ótima é de 3MPa a 10MPa, para cerâmica no estado cru (após secagem). Por outro lado, NORTON (1973) definiu a faixa do MRF que varia de 0,7 a

7,0MPa. SANTOS (1989) considera como limite mínimo 4,7MPa. Esta resistência tem importância devido à necessidade de movimentação das peças em estado cru na fábrica.

Todas as amostras ensaiadas neste estudo em estado cru (secas a 110°C) apresentaram valores do MRF superiores a 4,7MPa, sendo então, adequadas para a produção. As amostras de massa cerâmica com RG, após secagem, apresentaram maiores médias de módulo de resistência à flexão do que as amostra de massa cerâmica de referência.

Os resultados relativos às amostras queimadas a 800°C mostram que o MRF está abaixo da faixa estabelecida por DONDI (2006), para a amostra de referência e para as amostras com 10% de RG. Verificou-se que para esta temperatura todas as amostras após resfriamento estavam microfissuradas e fissuras implicam em redução de resistência. Observa-se ainda, que houve uma alta variabilidade nos resultados da massa de referência e com 10% de RG. Outra explicação para a perda de resistência é que a temperatura de 800°C implica em dilatação térmica, perda de matéria orgânica e água, reduzindo a resistência da matriz. Como nessa temperatura ainda não ocorre a formação de fluido vítreo (sinterização) os poros não são fechados, mantendo a matriz com pouca resistência.

Aos 900°C as massas cerâmicas com 10 e 15% de RG apresentaram uma redução de 11% no MRF em relação às massas de referência. Por outro lado, para temperatura de 1000°C as massas cerâmicas com 10% de RG reduziram o MRF em 24% em relação às massas de referência, enquanto que as massas com 15% de RG proporcionaram um aumento de 13% no MRF.

Todas as médias do MRF, para as temperaturas de 110, 900 e 1000°C, determinadas neste estudo estão na faixa da variação ótima segundo DONDI (2006) e significativamente superiores ao valor de referência do MRF de SANTOS (1989) e NORTON (1973).

6.5 PERDA DE MASSA AO FOGO (PMF)

As transformações ocorridas durante os tratamentos térmicos em grande parte são refletidas em perda de massa. A perda de massa está geralmente associada à

evaporação de água livre, adsorvida e de constituição, desintegração de compostos inorgânicos e eliminação de grupos de hidroxilas (VIEIRA et al, 2007b), (DUTRA et al, 2006) e (SANTOS, 1989).

A Tabela 6.9 apresenta os resultados obtidos para a perda de massa ao fogo em função dos teores de substituição de RG e das temperaturas de queima.

Tabela 6.9 – Perda de massa ao fogo dos corpos-de-prova queimados

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)			
	800	900	1000	
M₀₀	PMF Média (%)	5,99	6,59	6,61
	Desvio padrão	0,02	0,02	0,02
	Coef. de variação	0,33	0,30	0,30
M₁₀	PMF Média (%)	6,10	7,23	8,07
	Desvio padrão	0,02	0,03	0,03
	Coef. de variação	0,33	0,41	0,37
M₁₅	PMF Média (%)	7,05	7,92	8,53
	Desvio padrão	0,10	0,16	0,25
	Coef. de variação	1,41	2,02	2,93
M₂₀	PMF Média (%)	8,75	9,70	-
	Desvio padrão	0,02	0,14	-
	Coef. de variação	0,23	1,44	-

A Figura 6.10 apresenta comportamento das massas cerâmicas quanto à perda de massa ao fogo, em função das temperaturas de queima estudadas.

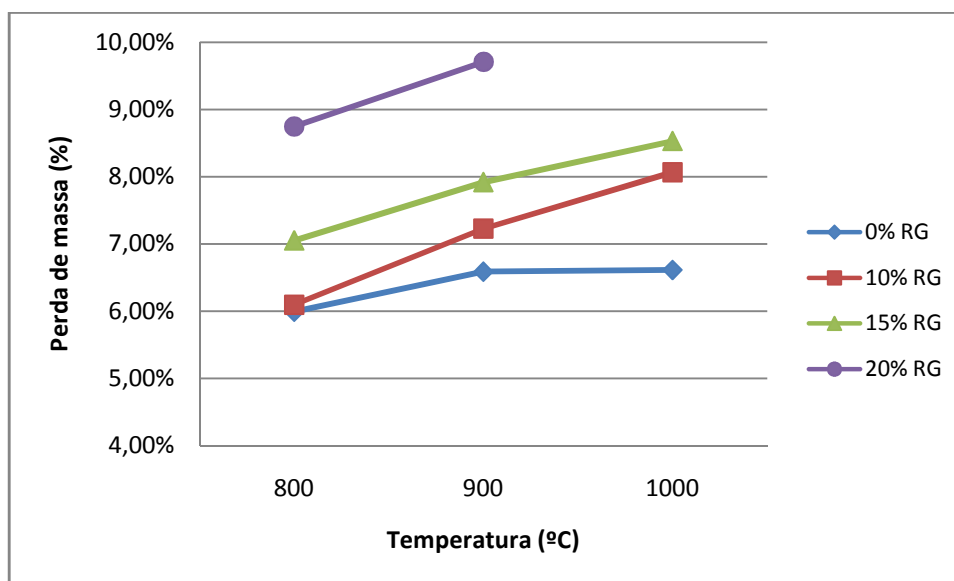


Figura 6.10 – Comportamento da perda de massa ao fogo das massas cerâmicas em função da temperatura de queima

Foi realizada a ANOVA para avaliar a influência da temperatura e do teor de RG, bem como da interação entre estes fatores sobre a PMF. A Tabela 6.10 mostra os resultados desta análise.

Tabela 6.10 – ANOVA dos resultados da temperatura e teor de RG influenciando na PMF

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1- Temperatura	2	7,0744	651,1518	3,270	S
2- Teor	2	7,7413	712,5324	3,270	S
3- 12	4	0,5936	54,6365	2,640	S
ERRO	36	0,0109			

GDL – Graus de liberdade

MQ – Média quadrada

Fcalc – Valor calculado de F

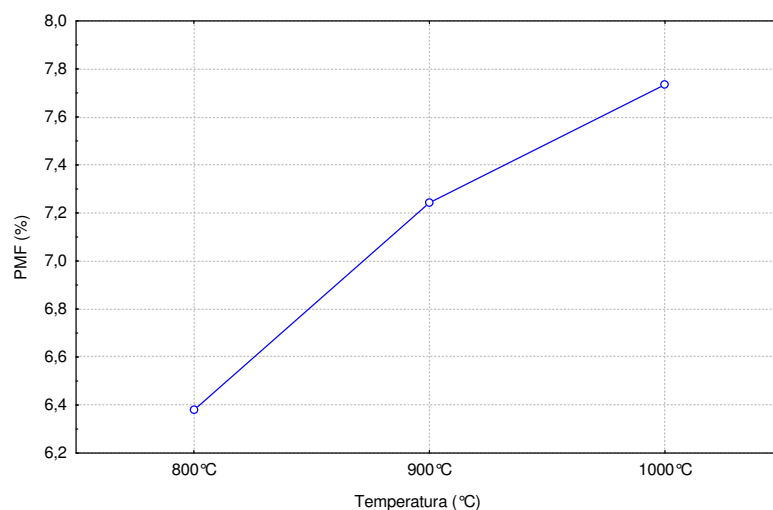
F0,05 – Valor tabelado de F para 5%

S - Significativo

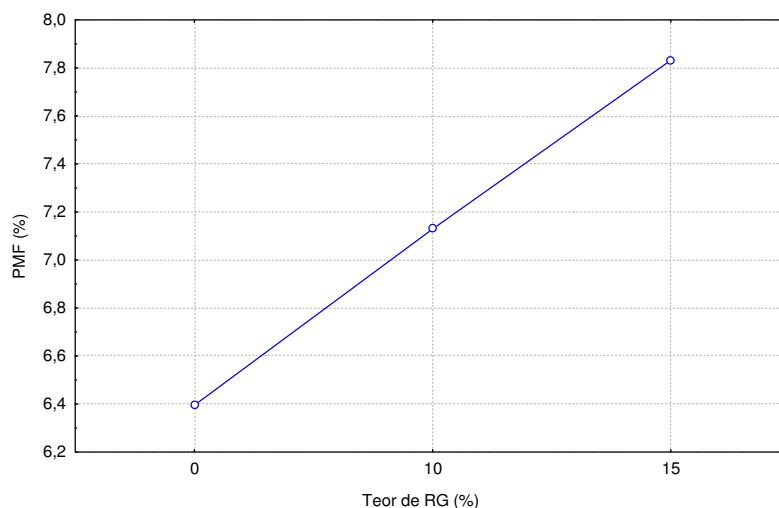
NS – Não significativo

Através da ANOVA verifica-se que é significativa a influência da temperatura de queima, do teor de RG e da interação entre estes dois fatores nos resultados de perda de massa ao fogo das massas cerâmicas.

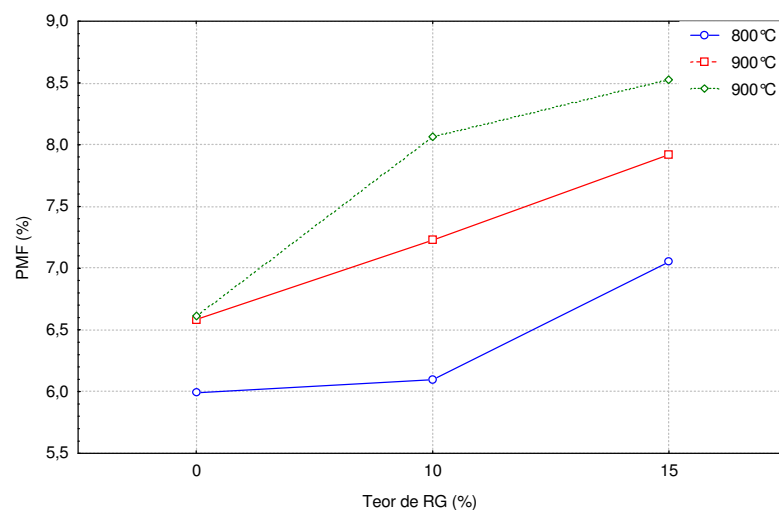
Com base na ANOVA, para se ter um melhor entendimento do comportamento das massas cerâmicas, foram traçados os gráficos dos efeitos (temperatura e teor do RG) e da interação entre temperatura e teor de RG em função da perda de massa ao fogo, conforme estão apresentados na Figura 6.11 (a),(b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 6.11 – Comportamento das amostras cerâmicas quanto à PMF em função: (a) temperatura; (b) teor de RG; (c) interação dos fatores: temperatura e teor de RG.

Assim como para retração linear, a perda de massa ao fogo das massas cerâmicas, cresce com o aumento do teor de RG para as temperaturas de queima estudadas. Há, portanto, relação entre a perda de massa ao fogo e a retração linear, para todos os percentuais de substituição de argila por RG além da massa de referência. A perda de massa ao fogo foi maior à medida que aumentou-se o percentual de RG. Este comportamento pode ser explicado pela quantidade de água que compõe as moléculas do Gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que é totalmente desidratado a partir de 800°C .

6.6 COR APÓS SECAGEM E QUEIMA

A cor vermelha das cerâmicas chamadas estruturais é decorrente e proporcional à quantidade de Fe_2O_3 presente nas argilas. É essa característica após queima que denomina as cerâmicas estruturais como cerâmica vermelha, sendo então a observação da cor importante para classificação da cerâmica.

Vale ressaltar que as classificações de cor são diversas. Existe uma grande subjetividade na precisão da cor.

A Tabela 6.11 apresenta a classificação de cores para cada uma das amostras avaliadas.

Tabela 6.11 – Cores após secagem e queima dos corpos-de-prova

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)			
	110	800	900	1000
M₀₀	TO.095.030	VR.100.070	VR.100.040	VR.100.050
	Tomate meio claro	Vermelho meio claro	Vermelho meio claro	Vermelho meio claro
M₁₀	TO.095.030	VR.100.070	VR.100.050	VR.070.090
	Tomate meio claro	Vermelho meio claro	Vermelho meio claro	Vermelho meio escuro
M₁₅	TO.095.030	VR.100.070	VR.100.050	VR.070.090
	Tomate meio claro	Vermelho meio claro	Vermelho meio claro	Vermelho meio escuro
M₂₀	TO.095.030	VR.100.070	VR.100.050	VR.070.090
	Tomate meio claro	Vermelho meio claro	Vermelho meio claro	Vermelho meio escuro

Tabela 6.11 as cores estão codificadas, sendo VR – vermelho, TO – tomate representando as matizes das cores, com os dois números seguintes representando respectivamente, grau de luminosidade e saturação. Exemplo: VR.070.090.

Verificou-se que a substituição da argila por RG não alterou as cores das amostras em relação à de referência para as temperaturas de 110°C (secagem), nem 800°C (queima), de acordo com a percepção do pesquisador.

Nas temperaturas de 900°C e 1000°C, não houve variação das cores entre as amostras com RG. Porém, em relação às amostras de referência, para a temperatura de 900°C ocorreu variação da saturação da cor, sendo de 40% para a amostra de referência e de 50% para as amostras com RG.

Para a temperatura de 1000°C ocorreu variação na luminosidade e saturação que foram respectivamente de 100% e 50% para a amostra de referência e de 70% e 90% para as amostras com RG.

O aumento do grau de saturação e redução do grau de luminosidade indica que as amostras com RG ficaram mais escuras após a queima do que as amostras de referência. Isto reforça o entendimento de que o RG em substituição de parte da argila pode contribuir para aumentar o grau de sinterização de peças cerâmicas.

7 CONCLUSÕES

É, cada vez mais evidente, a necessidade de que se tenha uma visão sistêmica nos processos produtivos, compatibilizando o desenvolvimento tecnológico com o desenvolvimento sustentável. Nesta perspectiva, a reciclagem de resíduos deve ser vista como uma importante alternativa não só para a sua destinação ambientalmente correta, como também para redução do consumo de recursos naturais. Neste contexto, a utilização do RG na massa cerâmica pode ser viável.

Com base nos resultados do programa experimental e nas análises realizadas pode-se chegar as conclusões que serão apresentadas a seguir.

As conclusões apresentadas neste estudo referem-se aos resultados obtidos em massas cerâmicas com tipos, quantidades e características específicas dos materiais e técnicas de execução utilizadas. Sua representatividade deve ser confirmada através de novos estudos, que devem ser realizados levando em consideração aspectos que possam confirmá-la e complementá-la.

7.1 QUANTO ÀS PROPRIEDADES CERÂMICAS AVALIADAS

As massas cerâmicas com 20% de RG em substituição à argila após queima a 800°C apresentaram fissurações e colapso total das peças para as temperaturas de queima de 900 e 1000°C.

Pode-se concluir que a substituição de parte da massa de argila por resíduo de gesso aumentou a retração linear à medida que se aumentou o percentual de RG e as temperaturas de queima. Isto significa que o grau de sinterização da peça cerâmica aumentou. A massa cerâmica que proporcionou maior retração linear foi com teor de 15% de RG. Apesar do aumento da retração, não foi verificada a presença de trincas ou fissuras nas peças.

Os resultados demonstraram que a porosidade aparente reduziu à medida que aumentou o percentual de substituição da massa de argila por RG e as temperaturas de queima. O melhor comportamento quanto à porosidade aparente foi observado na massa cerâmica com 15% de RG.

Os resultados mostraram que quanto maior o teor de RG na massa cerâmica menor a absorção de água. A massa cerâmica com teor de 15% de RG foi a que apresentou melhor desempenho.

Quanto ao módulo de resistência à flexão (MRF), verificou-se que a resistência com o teor de 10% de RG, para a temperatura de queima de 800°C, foi menor do que a de referência. Para temperatura de 900°C observou-se uma redução do MRF com a utilização de 10% e 15% de RG em substituição da argila. Para a temperatura de 1000°C houve uma redução no MRF da massa cerâmica com 10% de RG. Por outro lado, houve um aumento do MRF da massa cerâmica com 15% de RG em relação à de referência. Logo, o teor de 15% de RG apresentou melhor desempenho quanto à MRF.

A análise da perda de massa ao fogo demonstrou como esperado o comportamento similar ao observado na retração linear. Quanto maior o teor de RG e maior a temperatura de queima maior a perda de massa. Isto também evidencia o aumento do grau de sinterização das peças cerâmicas.

A análise da cor demonstrou alteração de tonalidade (luminosidade/saturação) para as peças cerâmicas com RG em relação às de referência nas temperaturas de queima de 900 e 1000°C. A variação na tonalidade foi mais acentuada para a temperatura de queima de 1000°C. Isto evidencia que a sinterização ocorreu a partir de 900°C e que o grau de sinterização aumenta a medida que aumenta-se a temperatura e a quantidade de RG na peça cerâmica.

Com base no programa experimental e analisando todas as propriedades em conjunto, pode-se concluir que o percentual recomendável de substituição de massa de argila por resíduo de gesso é de 15% para produção de blocos com temperaturas de queima de até 900°C e para produção de telhas com temperatura de queima de 1000°C.

Os estudos apontam, portanto, para a viabilidade ambiental, uma vez que, pode-se reduzir a utilização de matéria-prima e potencializar a aplicação do resíduo, propiciando uma adequação na sua destinação.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

No decorrer da pesquisa foram identificados assuntos para futuras pesquisas as quais podem trazer benefícios. De importância particular são os seguintes:

- determinação dos limites de plasticidade e liquidez para as massas cerâmicas com o resíduo adicionado, para definição da umidade ideal de conformação;
- ensaios de lixiviação e de solubilização para verificar os impactos ambientais da peça com resíduo ao longo de sua vida útil e após demolição;
- análises térmicas para maior conhecimento das reações que acontecem durante a queima e sinterização de peças cerâmicas com resíduo de gesso em sua composição;
- estudo da microestrutura das amostras;
- estudo da durabilidade dos materiais contendo resíduo de gesso;
- análise da viabilidade econômica da utilização do resíduo de gesso na indústria de cerâmica vermelha.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A.F.C. et al. **Efeito da adição de fonolito na sinterização da argila caulínica.** Cerâmica. v. 51, p. 361-370, 2005.

ANDRADE, A.F.C. et al. **Estudo de compósitos cerâmicos com resíduos de gesso da indústria da construção civil.** I Primeiro congresso de pesquisa e inovação da rede Norte Nordeste de educação tecnológica. Natal, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6220: Materiais refratários densos conformados – Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: massa específica real dos grãos. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: resíduos sólidos classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13207: gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13749: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - especificação. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13818: placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15310: componentes cerâmicos - telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

ACCHAR, W. **Using ornamental stones cutting rejects as raw materials for red clay ceramic products: Properties and microstructure development.** Materials Science & Engineering, p. 606-610, 2006.

ANTUNES, Rubiane P. N. **Estudo da influência da cal hidratada nas pastas de gesso.** (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

BALATON, V.T. et al. **Incorporação de resíduos sólidos galvânicos em massas de cerâmica vermelha.** Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 7, n.6, p. 42-45, 2002.

BUSTAMANTE, G.M. et al. **A indústria cerâmica brasileira.** Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 5, n.3, p. 31-36, 2000.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e engenharia de Materiais: Uma introdução.** Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CAMARGO, A.C. et al. **Adição de metais tóxicos a massas cerâmicas e avaliação da sua estabilidade frente a agente lixiviante. Parte 1: Avaliação das características físicas.** Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 10, n.2, p. 39-46, 2005.

CAMPELO, N. S. et al. **Estudo da utilização de resíduo cerâmico queimado (“chamote”) oriundo do pólo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru – AM, como aditivo na fabricação de telhas.** Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 11, n.1, p. 44-46, 2006.

CANUT, Mariana M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção.** (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

CARNEIRO, Alex P., et al. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador, 2001, EDUFBA, Caixa Econômica Federal. 312p

CARVALHO, M.T.M. **Estudo dos resíduos de gesso e suas aplicações na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2005.

CECOR – **Catálogo de 2.400 cores Standards**.

CONAMA. **Resolução n.º 307, de 5 de julho de 2002: Estabelece critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Disponível em: <www.mma.gov.br/conama>, Acesso em 23/02/06.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de Revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. Boletim Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), n.68. São Paulo: IPT. 1995.

DONDI, M. **Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados**. Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 11, n.3, p. 36-40, 2006.

DUTRA, R.P.S. et al. **Desenvolvimento de formulações de massas para a indústria de cerâmica vermelha do Rio Grande do Norte**. Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 11, n.3, p. 41-46, 2006.

JOHN, V. M., CINCOTTO, M. A. **Alternativas de Gestão dos Resíduos de Gesso**. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 2003. Disponível em <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>. Acesso em 23/02/2006.

JOHN, Vanderlei M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

LEITE, M. B., **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2001. 270p. Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/UFRGS.

MARTINS, C.A. et al. **Metodologia para avaliação da possibilidade de incorporação de resíduos industriais em massas cerâmicas conformadas por extrusão.** Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 10, n.4, p. 32-34, 2005.

MENEZES, R.R. et al. **Uso de rejeitos de granito como matérias-primas cerâmicas.** Cerâmica. v. 48, p. 92-101, 2002a.

MENEZES, R.R. et al. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Paraíba: v. 6, n.2, p. 303-313, 2002b.

MODESTO, C. et al. **Obtenção e caracterização de matérias cerâmicas a partir de resíduos sólidos industriais.** Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 8, n.4, p. 14-18, 2003.

MONTEIRO, S.N. et al. **Propriedades e características estruturais de cerâmicas argilosas incorporadas com gesso.** 13º CBECIMat Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Curitiba, 1998.

MOREIRA, J.M.S. et al. **Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha.** Cerâmica. v. 49, p. 262-267, 2003.

MOREIRA, J.M.S. et al. **Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do noroeste fluminense em cerâmica vermelha.** Cerâmica. v. 51, p. 180-186, 2005.

MOTTA, J.F.M. et al. **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte 1: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos.** Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 6, n.2, p. 28-39, 2001.

MOTTA, J.F.M. et al. **As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional: Argilas e Caulins.** Cerâmica Industrial. São Paulo: v. 9, n.2, p. 33-46, 2004.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000

NASCIMENTO, F. R. N. **Blocos cerâmicos contendo resíduos de fluoreto de cálcio: caracterização das propriedades cerâmicas e análise de risco ao meio ambiente.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2002.

NORTON, Frederick H. **Introdução à tecnologia cerâmica**. São Paulo: Edgar Blucher, 1973.

OLIVEIRA, E.M.S. et al. **Efeito do gesso na estrutura de cerâmica argilosa**. Anais do 53º Congresso anual da ABM. Belo Horizonte, 1999.

OLIVEIRA, G.E. et al. **Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha**. Cerâmica. v. 50, p. 75-80, 2004.

PASQUALOTTO FILHO, R. et al. **Gestão de resíduos da construção civil e demolição da cidade de São Paulo e normas existentes**. Revista Técnica IPEP, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 55-72, jan./jun. 2007.

PINHEIRO, R.M. et al. **Reciclagem de resíduo proveniente da produção de papel em cerâmica vermelha**. Matéria. v. 13, n. 1, p. 220-227, 2008.

RIBEIRO, A.S. **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil**. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2006.

SABOYA JR, F. et al. **The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic**. Construction and Building Materials, 2006, doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.029.

SANTOS, Pécisio S. **Ciências e tecnologia de argilas**. Volume 1. São Paulo: Edgar Blucher, 1989.

SANTOS, Pécisio S. **Tecnologia de argilas**. São Paulo: Editora da USP, 1975.

SELMO, Gerusa A. S. M. S. **Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção**. Boletim Técnico da Escola Politécnica as USP, São Paulo, 2004.

SENAI, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Método para determinação da retração linear**. EN 020 CON. Salvador, 2006.

SENAI, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Método para determinação da perda de massa ao fogo. EN 021 CON.** Salvador, 2006.

SICM, Secretaria da Indústria Comércio e Mineração. **Cerâmica vermelha na Bahia.** Salvador, 2005.

SILVA, J.B. et al. **Avaliação da incorporação de rejeitos de gesso de construção em formulações de massa cerâmica.** 17º CBECIMat Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, p. 2149-2160, 2006.

SOUZA, C.C. et al. **Alterações microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com rejeito de minério de ferro.** Matéria. v. 13, n. 1, p. 194-202, 2008.

VARGAS, Milton. **Introdução a mecânica dos solos.** São Paulo: McGraw-Hill, 1977.

VIEIRA, C.M.F. et al. **Cerâmica vermelha incorporada com lama fina de aciaria.** Matéria. v. 12, n. 3, p. 269-275, 2007a.

VIEIRA, C.M.F. et al. **Características e efeito da fração granulométrica < 2 μ m no comportamento de queima de uma argila.** Cerâmica. v. 53, p. 249-254, 2007b.

VIEIRA, C.M.F. et al. **Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha.** Cerâmica. v. 50, p. 254-260, 2004.

VIEIRA, C.M.F. et al. **Efeito da utilização da laterita nas propriedades físicas e mecânicas de cerâmica vermelha.** Matéria. v. 12, n. 3, p. 446-452, 2007c.

VLACK, Lawrence H. V. **Propriedade dos materiais cerâmicos.** São Paulo: Edgar Blucher, 1973.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Retração Linear

Quadro 1 – Retração linear dos corpos-de-prova cerâmicos na secagem (110°C)

MISTURA		M 0					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5			
COMPRIM. INICIAL (Lo) (cm)		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,00		
COMPRIM. FINAL (Lf) (cm)		9,42	9,42	9,42	9,44	9,44	9,43		
RETRAÇÃO LINEAR		5,80%	5,80%	5,80%	5,60%	5,60%	5,72%	0,11%	1,92%
MISTURA		M 10					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5			
COMPRIM. INICIAL (Lo) (cm)		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,00		
COMPRIM. FINAL (Lf) (cm)		9,39	9,40	9,39	9,40	9,41	9,40		
RETRAÇÃO LINEAR		6,10%	6,00%	6,10%	6,00%	5,90%	6,02%	0,08%	1,33%
MISTURA		M 15					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5			
COMPRIM. INICIAL (Lo) (cm)		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,00		
COMPRIM. FINAL (Lf) (cm)		9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36		
RETRAÇÃO LINEAR		6,40%	6,40%	6,40%	6,40%	6,40%	6,40%	0,00%	0,00%
MISTURA		M 20					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5			
COMPRIM. INICIAL (Lo) (cm)		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,00		
COMPRIM. FINAL (Lf) (cm)		9,37	9,39	9,36	9,36	9,39	9,37		
RETRAÇÃO LINEAR		6,30%	6,10%	6,40%	6,40%	6,10%	6,26%	0,15%	2,40%

Quadro 2 – Retração linear dos corpos-de-prova cerâmicos na temperatura de queima de 800°C

MISTURA		M 0					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5			
COMPRIM. INICIAL (Lo) (cm)		9,42	9,46	9,41	9,44	9,43	9,43		
COMPRIM. FINAL (Lf) (cm)		9,46	9,46	9,46	9,46	9,46	9,46		
RETRAÇÃO LINEAR		-0,42%	0,00%	-0,53%	-0,21%	-0,32%	-0,30%	0,20%	66,67%
MISTURA		M 10					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5			
COMPRIM. INICIAL (Lo) (cm)		9,42	9,41	9,43	9,43	9,43	9,42		
COMPRIM. FINAL (Lf) (cm)		9,46	9,45	9,45	9,45	9,45	9,45		
RETRAÇÃO LINEAR		-0,42%	-0,43%	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,30%	0,12%	40,00%
MISTURA		M 15					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5			
COMPRIM. INICIAL (Lo) (cm)		9,40	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38		
COMPRIM. FINAL (Lf) (cm)		9,43	9,42	9,42	9,42	9,42	9,42		
RETRAÇÃO LINEAR		-0,32%	-0,43%	-0,43%	-0,43%	-0,43%	-0,40%	0,05%	12,50%
MISTURA		M 20					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5			
COMPRIM. INICIAL (Lo) (cm)		9,36	9,39	9,39	9,37	9,40	9,38		
COMPRIM. FINAL (Lf) (cm)		9,34	9,37	9,38	9,37	9,40	9,37		
RETRAÇÃO LINEAR		0,21%	0,21%	0,11%	0,00%	0,00%	0,11%	0,11%	100,00%

APÊNDICE B – Porosidade Aparente

Quadro 1 – Porosidade aparente dos corpos-de-prova cerâmicos na temperatura de queima de 800°C

MISTURA		M 0					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10			
MASSA ÚMIDA (Mu) (g)		108,90	108,06	108,97	109,07	109,45	108,89		
MASSA SECA (Ms) (g)		92,80	93,08	93,06	93,17	93,46	93,11		
MASSA IMERSA (Mi) (g)		57,49	56,89	57,45	57,51	57,72	57,41		
POROSIDADE APARENTE (%)		31,32%	29,27%	30,88%	30,84%	30,91%	30,64%	0,79%	
								2,58%	
MISTURA		M 10					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10			
MASSA ÚMIDA (Mu) (g)		111,58	111,29	111,39	111,26	111,04	111,31		
MASSA SECA (Ms) (g)		96,43	96,29	96,20	96,18	96,13	96,25		
MASSA IMERSA (Mi) (g)		59,66	59,46	59,59	59,48	59,20	59,48		
POROSIDADE APARENTE (%)		29,18%	28,94%	29,32%	29,12%	28,76%	29,07%	0,22%	
								0,76%	
MISTURA		M 15					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10			
MASSA ÚMIDA (Mu) (g)		109,45	109,58	109,84	109,84	109,80	109,70		
MASSA SECA (Ms) (g)		95,36	95,41	95,59	95,65	95,65	95,53		
MASSA IMERSA (Mi) (g)		58,44	58,55	58,67	58,73	58,76	58,63		
POROSIDADE APARENTE (%)		27,62%	27,77%	27,85%	27,76%	27,72%	27,75%	0,08%	
								0,29%	
MISTURA		M 20					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10			
MASSA ÚMIDA (Mu) (g)		110,48	110,74	110,52	110,37	110,33	110,49		
MASSA SECA (Ms) (g)		94,84	95,04	94,94	94,88	94,93	94,93		
MASSA IMERSA (Mi) (g)		59,42	59,54	59,46	59,44	59,37	59,45		
POROSIDADE APARENTE (%)		30,63%	30,66%	30,51%	30,41%	30,22%	30,49%	0,18%	
								0,59%	

Quadro 2 – Porosidade aparente dos corpos-de-prova cerâmicos na temperatura de queima de 900°C

MISTURA		M 0					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10			
MASSA ÚMIDA (Mu) (g)		108,90	108,06	108,97	109,07	109,45	108,89		
MASSA SECA (Ms) (g)		92,80	93,08	93,06	93,17	93,46	93,11		
MASSA IMERSA (Mi) (g)		55,54	55,51	55,40	55,41	55,32	55,44		
POROSIDADE APARENTE (%)		30,17%	28,51%	29,70%	29,63%	29,54%	29,51%	0,61%	
								2,07%	
MISTURA		M 10					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10			
MASSA ÚMIDA (Mu) (g)		111,58	111,29	111,39	111,26	111,04	111,31		
MASSA SECA (Ms) (g)		96,43	96,29	96,20	96,18	96,13	96,25		
MASSA IMERSA (Mi) (g)		57,74	57,70	57,74	57,87	57,82	57,77		
POROSIDADE APARENTE (%)		28,14%	27,99%	28,31%	28,24%	28,02%	28,14%	0,14%	
								0,50%	
MISTURA		M 15					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10			
MASSA ÚMIDA (Mu) (g)		109,45	109,58	109,84	109,84	109,80	109,70		
MASSA SECA (Ms) (g)		95,36	95,41	95,59	95,65	95,65	95,53		
MASSA IMERSA (Mi) (g)		57,57	57,58	57,73	58,01	58,01	57,78		
POROSIDADE APARENTE (%)		27,16%	27,25%	27,35%	27,38%	27,32%	27,29%	0,09%	
								0,33%	
MISTURA		M 20					MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10			
MASSA ÚMIDA (Mu) (g)		-	-	-	-	-	-		
MASSA SECA (Ms) (g)		-	-	-	-	-	-		
MASSA IMERSA (Mi) (g)		-	-	-	-	-	-		
POROSIDADE APARENTE (%)		-	-	-	-	-	-	-	

APÊNDICE D – MRF

Quadro 1 – Módulo de resistência à flexão dos corpos-de-prova cerâmicos na secagem (110°C)

MISTURA		M 0							
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
ESPESSURA (e) (mm)		17,2	17,3	17,3	17,4	17,5	17,34		
LARGURA (B) (mm)		27,4	27,4	27,6	27,5	27,5	27,48		
FORÇA DE RUPTURA (F) (N)		354,29	423,63	418,29	391,72	441,40	405,87		
MRF (MPa)		5,24	6,20	6,08	5,65	6,29	5,89	0,44	7,47%
MISTURA		M 10							
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
ESPESSURA (e) (mm)		17,3	17,4	17,3	17,3	17,4	17,34		
LARGURA (B) (mm)		27,6	27,5	27,5	27,5	27,6	27,54		
FORÇA DE RUPTURA (F) (N)		422,25	453,47	490,73	479,17	528,68	474,86		
MRF (MPa)		6,13	6,54	7,15	6,99	7,59	6,88	0,56	8,13%
MISTURA		M 15							
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
ESPESSURA (e) (mm)		17,3	17,4	17,4	17,4	17,4	17,38		
LARGURA (B) (mm)		27,7	27,6	27,7	27,6	27,6	27,64		
FORÇA DE RUPTURA (F) (N)		481,07	485,90	516,95	490,21	498,15	494,46		
MRF (MPa)		6,96	6,98	7,40	7,04	7,15	7,11	0,18	2,53%
MISTURA		M 20							
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
ESPESSURA (e) (mm)		17,3	17,2	17,4	17,4	17,3	17,32		
LARGURA (B) (mm)		27,6	27,5	27,6	27,5	27,6	27,56		
FORÇA DE RUPTURA (F) (N)		460,54	488,14	506,77	512,46	542,99	502,18		
MRF (MPa)		6,69	7,20	7,28	7,39	7,89	7,29	0,43	5,90%

Quadro 2 – Módulo de resistência à flexão dos corpos-de-prova cerâmicos na temperatura de queima de 800°C

MISTURA		M 0							
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
ESPESSURA (e) (mm)		17,4	17,4	17,4	17,4	17,3	17,38		
LARGURA (B) (mm)		27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,60		
FORÇA DE RUPTURA (F) (N)		149,63	235,79	161,62	111,43	89,69	149,63		
MRF (MPa)		2,15	3,39	2,32	1,60	1,30	2,15	0,80	37,21%
MISTURA		M 10							
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
ESPESSURA (e) (mm)		17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,50		
LARGURA (B) (mm)		27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,80		
FORÇA DE RUPTURA (F) (N)		120,40	123,85	125,74	90,21	311,51	154,34		
MRF (MPa)		1,70	1,75	1,77	1,27	4,39	2,18	1,26	57,80%
MISTURA		M 15							
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
ESPESSURA (e) (mm)		17,5	17,4	17,4	17,4	17,4	17,42		
LARGURA (B) (mm)		27,6	27,7	27,7	27,7	27,7	27,68		
FORÇA DE RUPTURA (F) (N)		337,73	338,60	376,72	283,74	372,06	341,77		
MRF (MPa)		4,79	4,84	5,39	4,06	5,32	4,88	0,53	10,86%
MISTURA		M 20							
CORPOS DE PROVA		1	2	3	4	5	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
ESPESSURA (e) (mm)		17,5	17,4	-	-	17,5	17,47		
LARGURA (B) (mm)		27,7	27,6	-	-	27,7	27,67		
FORÇA DE RUPTURA (F) (N)		374,82	399,48	-	-	406,56	393,62		
MRF (MPa)		5,30	5,74	-	-	5,75	5,60	0,26	4,64%

APÊNDICE D – PMF

Quadro 1 – Perda de massa ao fogo dos corpos-de-prova cerâmicos na temperatura de queima de 800°C

MISTURA		M 0							
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
MASSA QUEIMADA (Mq) (g)		92,80	93,08	93,06	93,17	93,46	93,11		
MASSA SECA (Ms) (g)		98,73	99,01	99,00	99,08	99,42	99,05		
PERDA DE MASSA (%)		6,01%	5,99%	6,00%	5,96%	5,99%	5,99%	0,02%	0,33%
MISTURA		M 10							
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
MASSA QUEIMADA (Mq) (g)		96,43	96,29	96,20	96,18	96,13	96,25		
MASSA SECA (Ms) (g)		102,67	102,53	102,44	102,42	102,41	102,49		
PERDA DE MASSA (%)		6,08%	6,09%	6,09%	6,09%	6,13%	6,10%	0,02%	0,33%
MISTURA		M 15							
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
MASSA QUEIMADA (Mq) (g)		95,36	95,41	95,59	95,65	95,65	95,53		
MASSA SECA (Ms) (g)		102,74	102,74	102,72	102,85	102,85	102,78		
PERDA DE MASSA (%)		7,18%	7,13%	6,94%	7,00%	7,00%	7,05%	0,10%	1,42%
MISTURA		M 20							
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
MASSA QUEIMADA (Mq) (g)		94,84	95,04	94,94	94,88	94,93	94,93		
MASSA SECA (Ms) (g)		103,94	104,14	104,00	103,98	104,06	104,02		
PERDA DE MASSA (%)		8,76%	8,74%	8,71%	8,75%	8,77%	8,75%	0,02%	0,23%

Quadro 2 – Perda de massa ao fogo dos corpos-de-prova cerâmicos na temperatura de queima de 900°C

MISTURA		M 0							
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
MASSA QUEIMADA (Mq) (g)		91,95	91,86	91,80	91,74	91,66	91,80		
MASSA SECA (Ms) (g)		98,46	98,35	98,26	98,19	98,11	98,27		
PERDA DE MASSA (%)		6,61%	6,60%	6,57%	6,57%	6,57%	6,59%	0,02%	0,30%
MISTURA		M 10							
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
MASSA QUEIMADA (Mq) (g)		94,43	94,43	94,46	94,66	94,60	94,52		
MASSA SECA (Ms) (g)		101,82	101,76	101,77	102,05	102,00	101,88		
PERDA DE MASSA (%)		7,26%	7,20%	7,18%	7,24%	7,25%	7,23%	0,03%	0,41%
MISTURA		M15							
CORPOS DE PROVA		6	7	8	9	10	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
MASSA QUEIMADA (Mq) (g)		93,61	93,70	93,88	94,21	94,21	93,92		
MASSA SECA (Ms) (g)		101,82	101,89	102,02	102,08	102,18	102,00		
PERDA DE MASSA (%)		8,06%	8,04%	7,98%	7,71%	7,80%	7,92%	0,16%	2,02%
MISTURA		M20							
CORPOS DE PROVA		6	7	8 / 3	9	10	MÉDIA	D. PADRÃO	COEF. VAR.
MASSA QUEIMADA (Mq) (g)		93,53	93,51	93,74	93,23	92,67	93,34		
MASSA SECA (Ms) (g)		103,48	103,56	103,98	103,39	102,43	103,37		
PERDA DE MASSA (%)		9,62%	9,70%	9,85%	9,83%	9,53%	9,70%	0,14%	1,44%

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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