

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE CHAMOTE (RESÍDUO
CERÂMICO QUEIMADO) EM MASSAS CERÂMICAS
PARA A FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE VEDAÇÃO PARA
O DISTRITO FEDERAL –DF. UM ESTUDO
EXPERIMENTAL**

FERNANDA PEREIRA GOUVEIA

ORIENTADORA: ROSA MARIA SPOSTO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM - 006A/08

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2008

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE CHAMOTE (RESÍDUO
CERÂMICO QUEIMADO) EM MASSAS CERÂMICAS PARA A
FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE VEDAÇÃO PARA O DISTRITO
FEDERAL –DF. UM ESTUDO EXPERIMENTAL**

FERNANDA PEREIRA GOUVEIA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

APROVADA POR:

**Prof^ª Rosa Maria Sposto, DSc (ENC-UnB)
(Orientadora)**

**Prof. Neusa Maria Bezerra Motta, DSc. (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Gelmires de Araújo Neves, Dr. (UFCG)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 31 DE MARÇO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

GOUVEIA, FERNANDA PEREIRA GOUVEIA	
Efeito da Incorporação de Chamote (Resíduo Cerâmico Queimado) em massa cerâmicas para a Fabricação de Blocos Cerâmicos para o Distrito Federal. Um Estudo Experimental. [Distrito Federal] 2008.	
xvii, 94p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2008). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Resíduo sólido, chamote	2. bloco cerâmico
3. indústria cerâmica vermelha	4. Sustentabilidade
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GOUVEIA, F. P. (2008). Efeito da Incorporação de Chamote (Resíduo Cerâmico Queimado) em massa cerâmicas para a Fabricação de Blocos Cerâmicos para o Distrito Federal. Um Estudo Experimental. [Distrito Federal] 2008. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-006A/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fernanda Pereira Gouveia.

TÍTULO: Efeito da Incorporação de Chamote (Resíduo Cerâmico Queimado) em massa cerâmicas para a Fabricação de Blocos Cerâmicos para o Distrito Federal. Um Estudo Experimental.

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Fernanda Pereira Gouveia
SQN 406 bloco D Apto. 208, Asa Norte.
70.847-540 Brasília – DF – Brasil.

Dedico este trabalho aos meus
pais Renato Gouveia e Goreth
Bendelack, minha irmã Renata, por
todo amor, dedicação, confiança e
apoio transmitido por eles, mesmo que
distantes fisicamente...

AGRADECIMENTOS

À minha família, em primeiro lugar, em especial à minha mãe, responsável por toda minha educação, sabedoria, princípios, ensinamentos e valores tais como dignidade, respeito e humildade.

Mãe, você que confiou desde sempre em mim, mesmo preocupada e temerosa por eu ter quer residir em Brasília, dividindo moradia com amigos, estando longe de vocês. E sempre esteve ao meu lado, me apoiando em todas as horas, mesmo não estando fisicamente presente. Obrigada por tudo!

Ao Programa de pós graduação – PECC e ao competente corpo docente pelos ensinamentos ao longo do Mestrado, com destaque para professora Dr. Rosa Sposto que com sua sabedoria e competência orientou este trabalho com muito empenho. Sempre cordial, solícita e disposta a ajudar-me nesta caminhada. Esta relação orientador-aluno só me trouxe bons frutos, um deles foi o crescimento profissional e pessoal.

Para a realização dos ensaios laboratoriais o meu sincero agradecimento por toda disponibilidade e apoio técnico do:

- Laboratório de Geotecnia: Professora Isabel, chefe do laboratório e laboratoristas Vanilson (especialmente), Ricardo, Alessandro e Thiago.
- Instituto de Geociências: Professora Edir e Wagner
- Laboratório de Engenharia Mecânica: Professor Alex e Homero

Durante esses dois anos de curso, tive a oportunidade de construir amigos. A existência deles, o convívio diário e o apoio de todos foi simplesmente determinante para a minha permanência nesta caminhada.

Você, Sandra, amiga de todas as horas e companheira de apartamento. Obrigada pelo carinho, apoio e confiança.

Thania, Ary e Fábio, irmãos que encontrei aqui em Brasília. Sou muito grata por tudo que fizeram por mim e continuam fazendo.

Elisandra, ter você por perto é muito importante pra mim. Obrigada por sua amizade, ajuda no laboratório.

Miguel, que gentilmente cedia seu cartão da GOL para possibilitar algumas viagens para minha cidade, Belém. Não sei ainda como agradecer...

Edcélio, grande amigo, a quem sempre pude contar em muitos momentos.

Cláudio, companheiro de sala, se revelou um amigo, muito me ajudou na dissertação com seus palpites e acevo técnico.

Vanilson, sem sua ajuda este trabalho não seria realizado, sempre disponível e paciente nas realizações dos ensaios laboratoriais.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro concedido durante o mestrado.

A todos os outros que o nome não citei, mas que de alguma forma contribuíram para a realização dessa conquista, meu enorme agradecimento!

RESUMO

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE CHAMOTE (RESÍDUO CERÂMICO QUEIMADO) EM MASSA CERÂMICAS PARA A FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS PARA O DISTRITO FEDERAL

Autor: Fernanda Pereira Gouveia

Orientadora: Rosa Maria Sposto

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, março de 2008

Nas indústrias cerâmicas vermelha é facilmente visível o descarte de peças com defeitos, em lugares impróprios, ao longo de vias, no pátio da própria indústria ou até em áreas verdes. Na tentativa de reaproveitar este material fez-se um estudo experimental da utilização da incorporação do chamote em massas cerâmicas. O chamote foi obtido da queima de blocos cerâmicos, numa temperatura de 800°C. Para a transformação dos refugos de bloco em chamote, utilizou-se um triturador, tipo moinho de bolas. Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização química, física e mineralógica, para a argila e o chamote, ambos provenientes de uma indústria cerâmica estudo de caso, localizada em Petrolina-GO. Os corpos de prova foram conformados por extrusão, nas seguintes proporções de chamote: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, em peso. Os corpos cerâmicos foram submetidos a três temperaturas de queima; 850°C, 950°C e 1050°C para a investigação das propriedades tecnológica. As propriedades analisadas foram retração linear, porosidade aparente, absorção de água, massa específica aparente e resistência mecânica, esta última obtida pela tensão de ruptura à flexão em três pontos. Os resultados indicaram que a adição de chamote na massa cerâmicas minimizou a retração na secagem e conseqüentemente, retração na queima. Os menores valores de retração foram encontrados para a composição com 20% de chamote. A adição de 10%, apresentou melhores resultados em quase todas as propriedades, inclusive, elevados valores para resistência mecânica. Em relação à composição de 5% e 15%, não obtiveram valores tão expressivos para efeito de comparação com o corpo de prova isento de resíduo. O incremento de chamote acarretou aumento nas taxas de absorção de água e porosidade aparente, porém, os valores não ultrapassaram os limites sugeridos por Souza Santos (1975). A partir deste estudo, verificou-se que a incorporação de chamote em massa cerâmicas é possível, preferivelmente, para o teor de 10% de adição. Por outro lado, o estímulo do seu uso contribuiria para a consciência mais sustentável do setor.

ABSTRACT

In the ceramic industries red the discarding of bricks with defects is easily visible, in improper places, throughout ways, in the patio of the industry or even in green areas. In the attempt of recycling this material was carried out an experimental study of the waste ceramic incorporation use in ceramic bodies. The waste ceramic was gotten of ceramic blocks burned, in a temperature of 800°C. For the transformation block's garbage in waste ceramic, one used a milling machines, type balls mill. At the first time, the waste ceramic and clay were characterized in laboratory in terms the chemical, physical and mineralogical, both proceeding from a ceramic industry case's study, located in Petrolina-GO. Test specimens were conformed by vacuum extrusion, in the following ratios of waste ceramic: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, in weight. The ceramic bodies had been submitted the three temperatures of burning; 850°C, 950°C and 1050°C for the inquiry of the technological properties. The properties analyzed were linear retraction, apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity and mechanical strength, this last one gotten for the flexural rupture strength in three points. The results had indicated that the addition of waste ceramic in the ceramic body minimized the retraction in the drying and as a result, retraction in the burning. The lesser values of retraction had been found for the composition with 20% waste ceramic. The 10% addition, presented better resulted in almost all the properties, also, raised values for mechanical strength. Respecting the composition of 5% and 15%, they had not gotten so significative values in comparison with the specimens free from residue. The increment of waste ceramic increase the taxes of water absorption and apparent porosity, however, the values had not exceeded the limits suggested for Souza Santos (1975). From this study, it was verified that the incorporation of waste ceramic in ceramic body is possible, it's better, for the text of 10% of addition. On the other hand, the stimulton of its use would contribute for the conscience most sustainable of the sector.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - OBJETIVOS	2
1.2 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 – A INDÚSTRIA CERÂMICA VERMELHA.....	4
2.1 – CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA	5
2.2 – MATÉRIAS - PRIMAS	8
2.2.1 - Argila: Conceito	8
2.2.1.1 - Classificação das Argilas	9
2.2.1.2 - Propriedades das argilas	12
<i>a) Propriedades da argila no estado natural</i>	12
<i>b) Propriedades da argila no estado Plástico</i>	14
<i>c) Propriedades da argila seca</i>	16
2.2.1.3 Ensaio visando a identificação da composição química e mineralógica da matéria-prima.....	19
2.2.2 - Chamote: Conceito e Pesquisas.....	21
3 – O PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BLOCO CERÂMICO	26
3.1 - EXPLORAÇÃO DA JAZIDA	27
3.2 - TRATAMENTO DAS ARGILAS	28
3.3 - CONFORMAÇÃO E CORTE	29
3.4 - SECAGEM.....	30
3.5 - QUEIMA DE BLOCOS CERÂMICOS	33
3.6 PERDAS APÓS A QUEIMA E GERAÇÃO DO CHAMOTE	37
4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
4.1. COLETA DA MATÉRIA - PRIMA	42
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	45
4.2.1 Composição Química	46
4.2.2 Composição mineralógica	46
4.2.3 Caracterização Física.....	47
4.2.3.1 Distribuição granulométrica	47
4.2.3.2 Limite de Plasticidade	48
4.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	49
4.3.1 Formulação	49
4.3.2 Conformação	50
4.3.3 Secagem.....	50
4.3.4 Queima dos corpos de prova	51
4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS.....	52
4.4.1 Retração Linear.....	52
4.4.2 Absorção de Água (AA) e Porosidade Aparente (PA).....	53
4.4.3 Massa Específica Aparente (MEA)	54
4.4.4 Curva de gresificação	54
4.4.5 Resistência Mecânica	54

4.5 PERDA AO FOGO	56
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	57
5.1.1 Composição química	57
5.1.2 Composição mineralógica	58
5.1.2.1- Argila.....	58
5.1.2.2 - Chamote	59
5.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	61
5.3 LIMITE DE PLASTICIDADE.....	64
5.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS.....	66
5.4.1 Curva de gresificação	66
5.4.2 Resistência à flexão	71
5.4.3 Massa específica aparente	72
5.5 PERDA A FOGO	73
5.6 COR DE QUEIMA.....	74
6. CONCLUSÕES	76
7. SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DAS MATÉRIAS PRIMAS . 85

Tabela A1 – Resultado da análise granulométrica da argila e do chamote, com e sem a utilização de defloculante	85
Tabela A2 – Resultado da média dos valores para absorção de água, expresso em %	85
Tabela A6 – Dados e valores para resistência à flexão em três pontos dos corpos de prova, nas temperaturas de queima 850°C, 950°C e 1050°C.....	88

APÊNDICE B – TABELAS E GRÁFICOS DE REFERÊNCIA (SOUZA SANTOS, 1989)..... 91

Tabela B1- Valores limites recomendados (SOUZA SANTOS, 1975)	91
Gráfico B1 - Faixa de variação da tensão de ruptura à flexão das argilas padrão brasileiras após secagem a 110° C (Souza Santos, 1975)	91
Gráfico B2 - Faixa de variação da tensão de ruptura à flexão das argilas padrão brasileiras após queima a 950° C (Souza Santos, 1975)	92
Gráfico B3 - Faixa de variação da absorção de água das argilas padrão brasileiras após queima a 950° C (Souza Santos, 1975)	92
Gráfico B4 - Faixa de variação da porosidade aparente das argilas padrão brasileiras após queima a 950° C (Souza Santos, 1975).....	92
Gráfico B5 - Faixa de variação da massa específica aparente das argilas padrão brasileiras após queima a 950° C (Souza Santos, 1975)	93
Gráfico B6 - Faixa de variação da tensão de ruptura à flexão das argilas padrão brasileiras após queima a 1250° C (Souza Santos, 1975)	93
Gráfico B7- Faixa de variação da absorção de água das argilas padrão brasileiras após queima a 1250° C (Souza Santos, 1975)	93
Gráfico B8- Faixa de variação da porosidade aparente das argilas padrão brasileiras após queima a 1250° C (Souza Santos, 1975).....	94
Gráfico B9 - Faixa de variação da massa específica aparente das argilas padrão brasileiras após queima a 1250° C (Souza Santos, 1975)	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Panorama do setor cerâmico. (Fonte: ANICER, 2007)	5
Tabela 2.2 – Dados levantados para a indústria cerâmica vermelha de GO e DF. Sposto, Medeiros e Ramos (2005)	5
Tabela 2.3 - Classificação das matérias-primas segundo sua plasticidade (Fonte: CAPUTO, 1988).....	16
Tabela 4.1 – Recomendações de amostradores de resíduos e indicação do amostrador escolhido para a coleta do chamote, de acordo com a ABNT NBR10004:2004. ..	43
Tabela 4.2 – Recomendações sobre os pontos de amostragem para a coleta de resíduos e indicação do ponto de amostragem, conforme a ABNT NBR1007:2004.	44
Tabela 4.3 Composições a serem investigadas.....	49
Tabela 5.1 – Resultados obtidos na análise química das matérias-primas, destacando os elementos maiores, em %.	57
Tabela 5.2 - Quadro resumo das fases identificadas pelo difratograma para a argila e o chamote.....	61
Tabela 5.3 – Distribuição granulométrica da argila.	62
Tabela 5.4 – Distribuição granulométrica do chamote.....	63
Tabela 5.5 – Valores do índice de plasticidade da argila e dos limites de plasticidade das composições.	64
Tabela 5.7 Resultados da retração de secagem, temperatura 110°C.....	69
Tabela 5.8 Resultados da retração de queima em função da temperatura.	70
Tabela 5.9 Cor de queima dos corpos cerâmicos investigados para as três temperaturas de queima.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pólos cerâmicos do Estado de Goiás e Distrito Federal. Sposto, Medeiros e Ramos (2005)	6
Figura 2.2 - Número de fabricantes de blocos cerâmicos por município, situados em GO e no DF. Medeiros e Sposto (2005).....	7
Figura 2.3. – Tipo de fornos utilizados nas olarias de Goiás e Distrito Federal. Medeiros e Sposto (2005).....	7
Figura 2.4 – Tipo de combustível utilizado na sinterização de blocos de Goiás e Distrito Federal. Medeiros e Sposto (2005).....	8
Figura 2.5 - Classificação Ternária do Diagrama de Winkler de produtos argilosos, baseado na distribuição granulométrica de grãos e partículas em relação ao uso prático das matérias-primas. (I) tijolos sólidos; (II) tijolos perfurados; (III) telhas; (IV) produtos de parede (Fonte: SANTOS, 1975)	25
Figura 3.1. Fluxograma do processo típico da produção de blocos cerâmicos	26
Figura 3.2 – Extração de argila para produção de blocos cerâmicos (Fonte: MORAIS, 2006).....	27
Figura 3.3 - Sazonamento (Fonte: SPOSTO, MORAIS E PEREIRA, 2006)	28
Figura 3.4 – Preparo da argila para fabricação de blocos cerâmicos. a) homogeneização; b) laminação.(MORAIS, 2006)	29
Figura 3.5 – Produção de blocos cerâmicos na indústria estudo de caso. a) boquilha de moldagem; b) mesa de corte.....	30
Figura 3.6 – Secagem natural de blocos cerâmicos.....	32
Figura 3.7 - Heterogeneidade na secagem do bloco, devido a falta de controle de temperatura, umidade relativa do ar e tempo na secagem (SPOSTO, MORAIS E PEREIRA, 2006)	32
Figura 3.8. – Secagem artificial em blocos cerâmicos. a) secagem por meio de gases quentes e b) secagem por meio de ventiladores de teto.....	33
Figura 3.9 – Forno periódico de chama invertida. (a) detalhe da abóbada; (b) detalhe da porta; (c) detalhe da fornalha. (Fonte: MORAIS, 2006)	35
Figura 3.10 – Forno contínuo tipo túnel. a) entrada da zona de preaquecimento; b) saída da zona de resfriamento.....	36

Figura 3.11 – Resíduos de blocos cerâmicos depositados na indústria cerâmica selecionada.....	39
Figura 4.1 Esquema das variáveis de estudo	40
Figura 4.2 – Fluxograma representativo da produção e queima dos corpos de prova	41
Figura 4.3 – Vista da argila coletada no caixão alimentador da indústria em estudo	42
Figura 4.4 – Detalhe da coleta em monte ou pilha (seção e vista do topo). (Fonte: NBR 1007:2004).....	45
Figura 4.5 - Coleta do resíduo de blocos na indústria cerâmica selecionada. (a) Coleta segundo a ABNT NBR1007:2004; (b) Acondicionamento do resíduo.....	45
Figura 4.6 Vista do chamote e da argila utilizados para os ensaios	46
Figura 4.7 – Vista da realização dos ensaios para determinação do limite de liquidez (a) e determinação do limite de plasticidade da argila (b)	48
Figura 4.8 – Imagem da extrusora utilizada para a moldagem dos corpos de prova.....	50
Figura 4.9 – Figura dos corpos de prova em secagem natural (a) e secagem em estufa (b)	51
Figura 4.10 – Disposição dos corpos de prova na mufla.....	51
Figura 4.11 – Curva de aquecimento dos corpos de prova.....	52
Figura 4.12 – Máquina universal utilizada para o ensaio de resistência mecânica à flexão. Detalhe das barras cilíndricas, central e de apoio, recobertas de borracha	55
Figura 4.13 – Figura esquemática de montagem do ensaio de ruptura à flexão em três pontos	55
Figura 5.1 – Difratoograma da amostra de argila, mostrando as reflexões características dos minerais: quartzo, illita, caolinita, pirofilita, hematita, rutilo e microclínio	58
Figura 5.2 – Difratoograma da amostra chamote, indicando as reflexões características dos minerais: quartzo, illita, hematita, rutilo e diásporo	59
Figura 5.3 – Difratoograma do material chamote submetido ao aquecimento de 850°C, 950°C e 1050°C	60
Figura 5.4 – Distribuição granulométrica da argila com e sem a utilização de defloculante	62
Figura 5.5 – Distribuição granulométrica do chamote com e sem a utilização de defloculante	63
Figura 5.6 Curva de gresificação para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote.....	66

Figura 5.7 Representação esquemática do empacotamento de esferas de diferentes tamanhos (Barba, 1997).....	68
Figura 5.8 Vista da microestrutura dos corpos cerâmicos obtidas por microscópio eletrônico com 100x de aumento. (a) composição de argila (b) adição de 15% de chamote (c) adição de 20% de chamote	69
Figura 5.9 – Gráfico das tensões de ruptura para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote, submetidos à queima	71
Figura 5.10 – Massa específica aparente para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote, submetidos à queima	73

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

Å	angstrom
AA	Índice de absorção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
Al	alumínio
ARG	argila
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
b	largura do corpo de prova
Ca	cálcio
CH	chamote
cm ³	centímetro cúbico
d	distância interplanar
DF	Distrito Federal
F	Força
Fe	ferro
G	grama
GO	Goiás
h	hora
h	espessura do corpo de prova
k	potássio
Kv	quilovolts
LAGEQ	laboratório de geociências
L _o =	comprimento inicial do corpo de prova
L =	comprimento final do corpo de prova
LL	limite de liquidez
LP	limite de plasticidade
ICP/AES	Inductively coupled plasma optical emission spectrometer
ICP/EAS	Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy
IP	índice de plasticidade
M's	massa do corpo de prova seco antes da queima
Ms	massa do corpo de prova seco após a queima
Mi	massa do corpo de prova imerso após a queima
mA	miliampere
M.E.A	massa específica aparente
min	minuto
Mg	magnésio
Mn	manganês
mm	milímetro
Mpa	mega pascal
N	newton
Na	sódio
NBR	Norma Brasileira
NP	não plástico
P.A	porosidade aparente
PF	perda ao fogo
P _u	peso úmido do corpo de prova
Ps	peso seco do corpo de prova

Pi	peso imerso do corpo de prova
RL	retração linear
Si	sílica
Ti	titânio
UnB	Universidade de Brasília
σ	tensão de ruptura à flexão
5CH	massa cerâmica com adição de 5% de chamote, em peso
10CH	massa cerâmica com adição de 10% de chamote, em peso
15CH	massa cerâmica com adição de 15% de chamote, em peso
20CH	massa cerâmica com adição de 20% de chamote, em peso

1 - INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica vermelha no Brasil tem grande importância no cenário da indústria da construção civil, devido a expressiva produção nacional de blocos cerâmicos. Além disto, existe o fator cultural, indicando que os blocos cerâmicos ainda são preferência do consumidor na maioria das regiões, mesmo com o surgimento de outros blocos tais como bloco de concreto e concreto celular, dentre outros.

Na indústria local, o fornecimento de blocos cerâmicos que abastecem o mercado do Distrito Federal é realizado pelos estados de Goiás, Minas Gerais e pelo próprio Distrito Federal, porém o mais importante pólo fabricante é o estado de Goiás (SPOSTO, 2004).

De acordo com um estudo realizado por Moraes e Sposto (2006), a qualidade dos blocos cerâmicos produzidos em Goiás frequentemente deixa a desejar. Muitos fatores são responsáveis por isto, dentre eles o elevado teor de umidade dos blocos que são levados a queima, ocasionando defeitos tais como trincas por retração. Os autores também mencionam que as indústrias dessa região empregam temperaturas de queima inadequadas (inferiores a 950°C), o que compromete a fase de sinterização do corpo cerâmico, conseqüentemente diminuindo a resistência dos blocos.

Observa-se, ainda, na região em estudo, a escassez de pesquisas do processo de produção do bloco cerâmico, visando a melhoria da sua qualidade. Além disto, há a necessidade de estudos voltados para a redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da indústria cerâmica, uma vez que no seu processo ocorrem descartes de blocos com defeitos após a queima, depositados muitas vezes de maneira inadequada, nos “quintais” das indústrias ou jogadas no meio ambiente.

Neste trabalho pretende-se realizar um estudo experimental do efeito da adição do resíduo do bloco cerâmico queimado, denominado por chamote, em massas cerâmicas para a fabricação de blocos de vedação. As matérias-primas utilizadas neste trabalho (argila e chamote) são oriundas de uma Indústria Cerâmica localizada em Petrolina-GO, que é considerada uma das cinco principais fornecedoras do Distrito Federal – DF.

A produção mensal da indústria em questão é estimada em 750.000 blocos obtidos em fornos tipo intermitente com temperaturas de queima variando de 800°C a 950°C. A cada milheiro produzido, cerca de cem blocos apresentando defeitos são despejados nas áreas verdes adjacentes ao terreno da empresa. O aproveitamento deste resíduo vem a ser bastante oportuno, do ponto de vista ambiental, já que o impacto na sua disposição é reduzido.

O aproveitamento do chamote, obtido da fragmentação ou moagem dos blocos queimados descartados, é pouco utilizado no Brasil, ressaltando-se a existência de poucas pesquisas na área de massa cerâmica para fabricação de telhas.

O chamote como adição na massa cerâmica pode ter reflexos positivos sobre todo o processo produtivo, em especial na etapa de secagem, devido a adição contribuir com o melhoramento do grau de empacotamento e a morfologia das partículas (VIEIRA, 2004). Necessita-se, no entanto, da determinação da melhor mistura chamote - argila para se obter componentes de qualidade e em conformidade com as normas vigentes.

1.1 - OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar o efeito da incorporação do chamote em massas cerâmicas vermelhas dosadas em diferentes proporções. Além disto, pretende-se analisar a sua viabilidade na utilização de blocos cerâmicos de vedação para o DF.

Para a investigação da massa cerâmica proposta se faz necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- i) caracterização das matérias-primas, argila e chamote, quanto às suas composições químicas, mineralogias e determinação das propriedades físicas.
- ii) Produção de corpos de prova com massa cerâmica padrão e massa com adição de chamote para execução de ensaios tecnológicos.

iii) Comparação dos resultados dos ensaios laboratoriais dos corpos de prova com e sem adição de chamote.

1.2 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

No capítulo 1 são abordados uma introdução, o objeto e a estrutura da dissertação.

No capítulo dois são apresentados uma revisão bibliográfica a respeito da Indústria Cerâmica no cenário brasileiro e local e a fundamentação teórica das matérias – primas argila e chamote.

No capítulo três são descritas as etapas do processo produtivo do bloco cerâmico e também abordadas as “perdas” obtidas após o processo de queima (geração do chamote).

O procedimento experimental adotado é abordado no capítulo quatro e está subdividido na caracterização química, física e mineralógica das matérias-primas utilizadas, na produção dos corpos-de-prova e na determinação das propriedades tecnológicas.

No capítulo cinco parte-se para a apresentação e a discussão dos resultados dos ensaios tecnológicos.

E por último, apresentam-se as considerações finais no capítulo seis, baseadas nos resultados atingidos com a utilização do chamote em massas cerâmicas para a produção de blocos.

2 – A INDÚSTRIA CERÂMICA VERMELHA

Denomina-se por indústria de cerâmica vermelha a indústria de blocos, tijolos, telhas, tubos, ladrilhos, elementos vazados e outros. As matérias-primas empregadas nesta indústria são constituídas por argilas plásticas (caulinito-ilíticas) cujos componentes principais são os argilominerais (silicatos hidratados de alumínio), matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. São retiradas, geralmente, de margens de rios, lagos ou de várzeas (SANTOS, 1989).

Segundo Bauer, 2000 o emprego de materiais cerâmicos teve início nos tempos mais primitivos da história da humanidade, pois como uma matéria-prima abundante na natureza, a argila teve sua utilização rapidamente difundida na fabricação de produtos cerâmicos que são obtidos pela moldagem, secagem e cozimento de argilas ou de misturas contendo argilas.

No Brasil, a indústria cerâmica utiliza processos manuais ou mecânicos de moldagem que podem ser por prensagem ou extrusão. As temperaturas de queima oscilam entre 950⁰C e 1250⁰C, conforme a natureza da argila, do produto cerâmico, do forno utilizado e das condições econômicas do local (SANTOS, 1989).

Podem-se destacar como principais produtores nacionais, os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina e Bahia (ANICER, 2007)

De acordo com os dados da ANICER, Tabela 2.1., o número de indústrias cerâmicas no Brasil é de aproximadamente 5.500 empresas, as quais geram 400 mil empregos diretos, 1,25 milhões de empregos indiretos e um faturamento anual de R\$ 6 bilhões.

Tabela 2.1 – Panorama do setor cerâmico. (Fonte: ANICER, 2007)

	Nº de empresas aproximado	% aproximada por área	Produção/mês (nº de peças)	Consumo ton /mês (matéria-prima: argila)
Blocos/Tijolos	3600	63%	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	1900	36%	1.300.000.000	2.500.000
Tubos	12	0,1%	325,5Km*	-

*Produção apontada pela Associação Latino-Americana de Fabricantes de Tubos Cerâmicos (Acertubos), considerando o número de 10 empresas, responsáveis pela fabricação de 3.906km/ano.

Ainda segundo a ANICER (2007), a indústria de cerâmica vermelha corresponde a 4,8% da indústria da construção civil. E a indústria da construção civil por sua vez, representa 7,3% do PIB nacional, ou seja, R\$ 126,2 bilhões. Esses dados comprovam que de fato, a Indústria Cerâmica desempenha importante papel na economia do Brasil.

2.1 – CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA CERÂMICA

Em relação ao mercado local, um trabalho realizado por Sposto, Medeiros e Ramos (2005) descreveu o perfil da indústria ceramista do estado de Goiás e DF, Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Dados levantados para a indústria cerâmica vermelha de GO e DF. Sposto, Medeiros e Ramos (2005)

Cerâmica vermelha	
Nº empresas do DF e GO	214
Produção total (milhões peças/mês)	58,75
Produção média por empresa (peças/mês)	274.523
Empregos diretos	5.804

Conforme é apresentado na Figura 2.1, o Estado de Goiás possui o maior pólo cerâmico, onde se verifica a concentração das principais indústrias de cerâmica vermelha que abastecem o mercado do DF, fornecendo na maioria das vezes, para grandes empresas de construção civil.

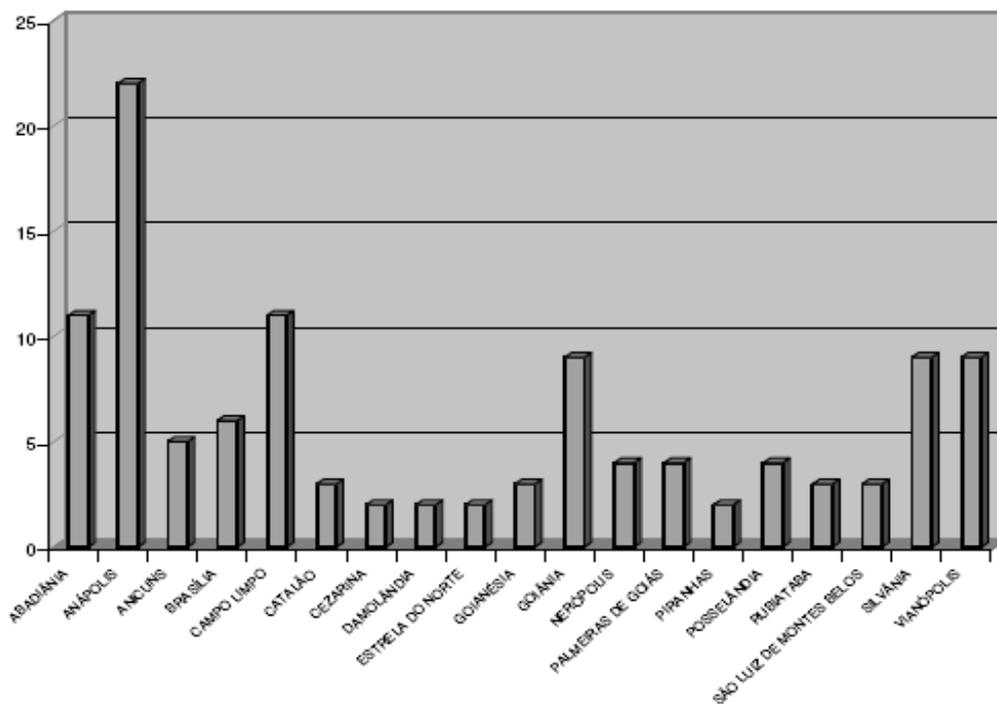


Figura 2.2 - Número de fabricantes de blocos cerâmicos por município, situados em GO e no DF. Medeiros e Sposto (2005)

Ainda, em pesquisa realizada por Medeiros e Sposto (2005) observou-se que 90,83% das indústrias ainda utilizam fornos convencionais que incluem os fornos paulistinha, chama reversível e caieira. Fornos contínuos do tipo Hoffmman e túnel são utilizados por aproximadamente 9% das indústrias ceramistas como mostra a Figura 2.3.

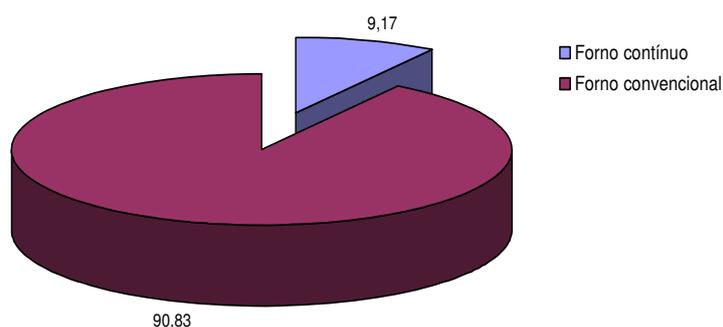


Figura 2.3. – Tipo de fornos utilizados nas olarias de Goiás e Distrito Federal. Medeiros e Sposto (2005)

Dentre os combustíveis consumidos pelo setor de cerâmica vermelha, o que tem maior evidência ainda é a lenha. Nota-se que cada região busca alternativas energéticas em

função da maior ou menor disponibilidade de lenha e seus resíduos. Pode-se citar como exemplo, a serragem e rejeitos de madeira pela presença de indústrias madeireiras. A busca por combustíveis alternativos é demonstrada na Figura 2.4.

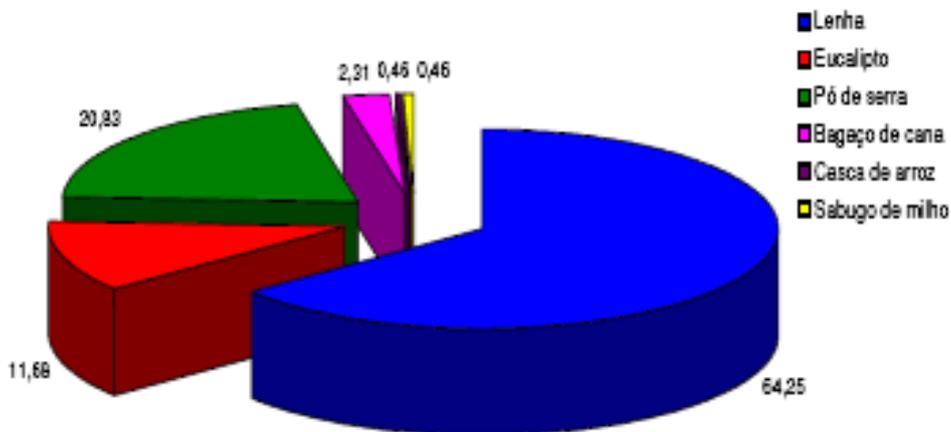


Figura 2.4 – Tipo de combustível utilizado na sinterização de blocos de Goiás e Distrito Federal. Medeiros e Sposto (2005)

2.2 – MATÉRIAS - PRIMAS

A argila é a principal matéria-prima empregada na indústria da cerâmica vermelha ou estrutural. Para o alcance dos objetivos da pesquisa, se faz necessário o entendimento das suas características e propriedades, que são expostas a seguir..

As matérias-primas plásticas, representadas pelas argilas proporcionam plasticidade na presença de água e resistência mecânica a verde, adequada para a manipulação do pré – produto. Entretanto, existem as matérias primas não-plásticas, embora estas não sejam freqüentemente aplicadas na indústria cerâmica vermelha; estas melhoram a compactabilidade e secagem, e reduzem a retração linear das peças. Dentre estas matérias-primas pode-se destacar o chamote, que será definido mais adiante.

2.2.1 - Argila: Conceito

Amarante (1993) apud Vicenzi (1999) define argilas como produtos da alteração intempérica de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Em seu estado natural, as argilas são constituídas de minerais primários (que se encontram presentes nas rochas, e

apenas se alteraram sua composição) e/ou minerais secundários (produzidos pela ação de agentes químicos sobre os minerais primários). Pela sua formação e localização, as argilas podem ser consideradas residuais, formadas *in situ* (que sofreram pouco ou nenhum transporte e contêm uma proporção de minerais primários maior que as argilas sedimentares) e/ou sedimentares (que foram transportadas e depositadas, encontrando-se poucos minerais associados às rochas, com exceção de quartzo e alguma muscovita).

Santos (1989) ressalta que o termo argila significa material de textura terrosa e de baixa granulometria, que desenvolve plasticidade quando misturado com determinada quantidade de água. É constituída essencialmente por partículas cristalinas extremamente pequenas conhecidas como “argilominerais”. Quimicamente os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo ainda, certo teor de alcalinos e alcalinos terrosos. Além dos argilominerais, as argilas contêm, geralmente, outros materiais e minerais, tais como “matéria orgânica”, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, e podem conter também minerais não-cristalinos ou amorfos.

O conceito mais aceito pelos ceramistas, sob o ponto de vista da tecnologia cerâmica, é o de Pinto (1997) que define a argila como um sedimento com tamanho de partícula inferior a 4µm, constituída em grande parte por argilominerais, podendo conter impurezas; desenvolve plasticidade com a adição de uma quantidade conveniente de água, perdendo-a após a secagem (água de conformação) e, após a queima (água de estrutura) a uma temperatura superior a 1000°C, adquire alta resistência.

2.2.1.1 - Classificação das Argilas

A classificação das argilas pode ser feita segundo sua estrutura cristalina, seu emprego, além de, no geral, serem classificadas segundo suas características e propriedades essenciais. A seguir serão apresentadas as diversas formas de classificação das argilas.

a) Segundo sua estrutura cristalina

Conforme Petrucci (1998), quanto à estrutura cristalina, as argilas classificam-se em: a) laminar, subdividida em caulinitas, montmorilonitas e illitas e b) fibrosas. Somente as de estrutura laminar são usadas na fabricação de produtos cerâmicos. As caulinitas são as mais puras e usadas na indústria de refratários, são misturadas com as caulinitas para corrigir a plasticidade da massa cerâmica. As illitas são as mais abundantes e também as mais empregadas na fabricação de blocos cerâmicos.

b) Segundo seu emprego

As argilas, segundo o seu emprego são divididas, em argilas infusíveis, fusíveis e refratárias. Denomina-se infusíveis aquelas que são constituídas de caulins puros, as argilas fusíveis são aquelas que são usadas na fabricação de tijolos cerâmicos, as quase deformação a temperaturas abaixo de 1500°C e refratárias aquelas igualmente muito puras, mas com baixo coeficiente de condutibilidade térmica (Petrucci, 1989).

c) Classificação Geral das argilas

- Argilas plásticas

As argilas plásticas, também denominadas gordas, são constituídas e argilominerais de granulometria muito fina . De acordo com Kingery (1960), a plasticidade provem das partículas coloidais que possuem grande atração promovendo assim alta plasticidade à mistura.

Juntando-se água lentamente a uma argila notam-se duas fases: no início se desagrega facilmente e no final fica mole demais, devendo o ponto de maior plasticidade ser aquele em que o material não mais se desagrega e tampouco é pegajoso.

Segundo Santos (1989), algumas peculiaridades das argilas gordas devem ser levadas em conta, como por exemplo, o fato delas apresentarem dificuldade na secagem pela elevada retração e possuírem ótimas características que favorecem a moldagem das peças, com baixo consumo de energia e reduzido desgaste das máquinas. Alguns cuidados devem ser tomados na etapa de secagem, principalmente se for natural. Por serem pouco permeáveis, as argilas gordas dificultam a rápida difusão da água do centro

para a superfície da peça, causando secagem diferencial com o aparecimento de tensões, deformações e trincas. No entanto, se controladas essas operações, consegue-se, em geral, componentes com elevada resistência mecânica.

Caputo (1988) apresenta uma classificação dos solos argilosos com relação ao seu índice de plasticidade (IP), conforme pode ser visto na Tabela 2.3, que são: fracamente plásticas, medianamente plásticas e altamente plásticas.

- Argilas de baixa plasticidade

As argilas de baixa plasticidade podem ser conhecidas por argilas magras e são consideradas argilitos siltosos com elevados teores de sílica na sua forma livre; apresentam baixa resistência no estado após a secagem e baixa retração linear. Essas argilas são usadas normalmente para a correção da plasticidade daquelas que apresentam plasticidade muito alta (CARDOSO, 1995).

- Argilas carbonosas e betuminosas

As argilas carbonosas e betuminosas em geral apresentam a cor marrom ou preta e são consideradas de boa qualidade devido à sua pureza. Esta coloração é obtida da seguinte maneira: a vegetação contida nestas argilas produz CO₂ que por processos de composição permanece nas argilas em pequenas quantidades de substâncias carbonosas ou betuminosas, que favorecem a eliminação dos elementos corantes. Esses corantes, na maioria das vezes óxidos de ferro, são reduzidos à forma mais solúvel e removido pela água de percolação durante o processo de lixiviação. Essas argilas são de natureza refratária, tendo aplicação mais nobre, não sendo indicadas para a classe de produtos de cerâmica vermelha (CARDOSO, 1995).

- Argilas fundentes

As argilas fundentes são aquelas que podem ser fundidas a temperaturas relativamente baixas daí a justificativa desse nome, e são usadas na cerâmica estrutural, sendo de origem caulínica, com granulometria fina e ricas em matéria orgânica e quartzo, contendo teores variáveis de óxidos. Geralmente esta matéria-prima apresenta cor escura após a queima acima de 1200°C e funde-se totalmente à temperatura de 1400°C, o que exclui das possibilidades de uso como o material refratário (SANTOS, 1989).

- Argilas aglomerantes

Normalmente as argilas aglomerantes são usadas na fabricação de produtos da cerâmica branca e apresentam elevada resistência no estado cru, grande plasticidade e facilidade de dissolução em água. A massa para a fabricação de cerâmica branca geralmente é composta de argila plástica, caulim, quartzo e feldspato, na proporção de 25% cada. A resistência deste material no estado cru favorece o empilhamento das peças nos fornos, evitando-se quebras (UNIKOWSKI, 1982).

Segundo Cardoso (1995) quando as peças que utilizam esse tipo de argila são queimadas à temperatura de 1250°C, conseguem-se cores claras, podendo também ser utilizadas como argilas refratárias com alto poder ligante.

- Argilas refratárias

A principal característica desse tipo de argila é a boa resistência ao fogo sem ser fundida. Elas apresentam uma mínima porcentagem de impurezas e possuem uma baixa relação sílica/alumínio.

2.2.1.2 - Propriedades das argilas

As argilas se encontram em três estados distintos: natural, plástico e seco. Para cada estado se destacam propriedades essenciais que servirão para caracterizar o material e ajudar na definição de sua utilização. Essas propriedades serão descritas a seguir:

a) Propriedades da argila no estado natural

- Granulometria

Segundo Gomes (1988) e Souza Santos (1989), o tamanho das partículas das argilas é uma característica muito importante, uma vez que ele influencia outras propriedades, tais como: plasticidade, permeabilidade e resistência no estado seco ao ar, que são

dependentes, além da dimensão das partículas, da distribuição granulométrica e de sua forma.

Conforme Petrucci (1998), a composição granulométrica da argila tem íntima relação com sua resistência no estado seco ao ar. A distribuição do tamanho das partículas mais adequada para uma argila oferecer boa resistência à flexão é aquela que possui minerais argilosos em torno de 60%, estando o resto do material dividido igualmente entre silte, areia fina e média.

Este autor recomenda que, quando a granulometria original das argilas não atende aos critérios mencionados anteriormente, estas devem ser dosadas a fim de apresentar plasticidade máxima quando úmida, resistência à tração máxima quando seca, e retração mínima durante a secagem.

Por outro lado, Macedo (1997) afirma que a finura da argila não influencia somente na sua plasticidade, mas também se estende a outras propriedades, tais como: comportamento na secagem, retração de secagem, empenamento e resistência à flexão.

Existem diversos processos para a determinação da distribuição granulométrica da argila. Os mais precisos são a difração a laser e a determinação da velocidade de sedimentação por absorção de raios – X. Esses métodos geram uma curva de distribuição granulométrica com grande precisão. O método convencional, porém, de menor precisão é o da distribuição granulométrica por peneiramento. No Brasil são utilizadas as peneiras especificadas na ABNT NBR 7181:1984.

- Forma das partículas

É muito importante conhecer a forma dos compostos presentes e de que maneira eles podem interferir nas outras propriedades. A área específica de cada argila é diretamente afetada por esta característica. Sabe-se que as partículas de haloisita aparecem geralmente na forma tubular, as partículas de ilitas são ripiformes e as partículas de montmorilonitas são lamelares de perfil irregular. A verificação da forma é realizada com maior precisão através da microscopia eletrônica (SANTOS, 1989).

- Composição química e forma cristalina

A composição química de uma argila define basicamente a sua aplicação, ou seja, dependendo dos componentes químicos que as argilas contêm pode-se usa-las em vários tipos de indústrias cerâmicas.

b) Propriedades da argila no estado Plástico

- Plasticidade

Plasticidade é a propriedade que um sistema possui de se deformar pela aplicação de uma força e de manter essa deformação quando a força aplicada é retirada. (SANTOS, 1989). A plasticidade é fundamental para as argilas destinadas à produção da cerâmica vermelha, uma vez que elas, normalmente, são moldadas por extrusão

Conforme este autor, a plasticidade das argilas é essencialmente resultante das forças de atração entre as partículas lamelares dos argilominerais e a ação lubrificante da água. Pode-se admitir que a plasticidade desenvolve-se quando a argila tem água suficiente para cobrir toda a superfície dos argilominerais com uma película de água, que age como lubrificante, facilitando o deslizamento da fração lamelar umas sobre as outras quando uma tensão tangencial for aplicada.

De acordo com Bauer (2000), Gomes (1988) e Souza Santos (1989), a plasticidade das argilas está diretamente correlacionada com fatores da própria matéria-prima, tais como: composição mineralógica, dimensões e formato das partículas e da presença de outros minerais, além dos argilominerais. A plasticidade será maior em argilas com maior teor de minerais argilosos e maior porcentagem de grãos finos. Petrucci (1998) afirma que a plasticidade nas argilas varia, ainda, com a quantidade de água empregada no seu processo de conformação.

Ainda, conforme Kazmierczak (2007) para que uma argila apresente plasticidade é necessário que a quantidade de água existente no sistema seja superior à necessária para

cobrir a superfície dos argilominerais: as moléculas de água adsorvidas à superfície dos argilominerais formam uma película denominada “água rígida”, que fica aderida à superfície por pontes de hidrogênio e é “orientada” eletricamente: o restante da água age como lubrificante permitindo o deslizamento entre as partículas lamelares dos argilominerais.

Na fabricação de cerâmica vermelha procura-se determinar a mínima quantidade de água necessária para permitir uma moldagem adequada, uma vez que, teores excessivos de água podem gerar elevadas contrações durante as etapas de secagem e queima (resultando em deformações e fissuras) e um aumento na porosidade da cerâmica, com conseqüente perda de resistência mecânica e aumento da permeabilidade à água.

As relações entre quantidade de água rígida e a massa da argila, bem como o total de água e a massa de argila são denominados índices de Atterberg. Esses índices também são denominados: Limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP).

O limite de plasticidade é o mínimo teor de água. Em relação à argila seca, que permite a moldagem de cilindros com cerca de 3 mm de diâmetro e 100 mm a 150 mm de comprimento, sem que ocorram fissuras. O limite de liquidez é o teor de água, em relação à argila seca, acima do qual a massa flui quando agitada. No Brasil, é determinado por meio do método de Casagrande, descrito na ABNT NBR 7180:1984.

O índice de plasticidade é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Os valores destes limites variam muito em função das características de cada argila.

Conforme Caputo (1988) os solos podem ser classificados em função do índice de plasticidade, Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação das matérias-primas segundo sua plasticidade (Fonte:

Tabela 2.3 - Classificação das matérias-primas segundo sua plasticidade (Fonte: CAPUTO, 1988)

CLASSIFICAÇÃO	ÍNDICES
Fracamente plásticas	$1 \leq IP \leq 7$
Mediamente Plásticas	$7 \leq IP \leq 15$
Altamente Plásticas	$IP > 15$

Fiori (2001) sugere outra classificação para os solos, ainda conforme o índice de plasticidade, da seguinte forma: a) não plástico: $IP < 1$; b) levemente plástico: $1 < IP < 7$; c) moderadamente plástico: $7 < IP < 17$; d) altamente plástico: $17 < IP < 35$ e; e) extremamente plástico: $IP > 35$.

Segundo Souza Santos (1989) a quantidade de água necessária para tornar uma argila suficientemente plástica, para ser moldada por um determinado método é denominada água de plasticidade ou água de moldagem. Para este autor, qualquer que seja o tipo de moldagem (plástica, semiplástica, semi-seca, manual, colagem), quanto mais plástica é uma argila maior é a água de moldagem e também o limite de plasticidade, isto é, mais água é necessária para formar uma massa plástica. A água de moldagem para a extrusão é igual ou superior ao limite de plasticidade da mesma argila, porém é inferior ao limite de liquidez. Write (1965) apud Souza Santos (1989) fez um estudo detalhado do limite de plasticidade das argilas. A faixa de variação da água de moldagem dos grupos de argilominerais é a seguinte: a) caulinita – entre 8,9 e 56,3 %; b) illita – entre 17 e 38,5 %; c) montmorilonita – entre 82,9 e 250 %.

c) Propriedades da argila seca

- Tensão de ruptura

De acordo com Souza Santos (1989) a resistência mecânica de uma argila seca (isto é, abaixo do limite de plasticidade e até a expulsão de toda a água capilar pelo aquecimento a 110°C) pode ser medida pelas seguintes grandezas: a) tensão de ruptura à flexão; b) tensão de ruptura à compressão; e c) tensão de ruptura à tração. Norton (1973) afirma que todas elas se desenvolvem pela adição de água à argila, em teores iguais ou superiores a ao limite de plasticidade.

Souza Santos (1989) explica que a tensão de ruptura de flexão (transverse strength ou dry strength) de uma argila é medida adicionando-se, à argila, água suficiente para formar uma massa plástica, moldando em seguida (manualmente, por extrusão, por pressão ou por colagem em gesso) corpos de prova de forma e dimensões padronizadas; secam-se os corpos de prova ao ar e à temperatura ambiente e depois a 110°C e quebram-se os corpos de prova suportados sobre dois apoios. A American Ceramic Society (1928) padronizou para esse ensaio barras de perfil retangular de 200 x 20 x 10 mm moldados manualmente ou por extrusão.

A tensão de ruptura à flexão depende da distribuição granulométrica e da composição mineralógica da argila. A tensão de ruptura à flexão da caulinita aumenta com a diminuição da granulometria. Aumento do teor de illita de diâmetro equivalente abaixo de 2µm aumenta a tensão de ruptura à flexão de argilas para cerâmica vermelha. A elevada tendência à contração na secagem faz com que as argilas muito ricas em montmorilonitas tenham tensão de ruptura à flexão menos do que as argilas ilíticas de devidos às trincas dos corpos de prova. (SOUZA SANTOS, 1989).

- Retração linear de secagem e queima

A retração é a tendência que a argila tem em diminuir de volume pela perda de umidade por secagem e queima. Conforme Pianca (1977), é importante conhecer o grau de retração da argila, a fim de dar aos blocos cerâmicos crus dimensões que depois de queimados alcancem as medidas requeridas.

A determinação da retração linear corre na cerâmica ao longo do processo de fabricação. As dimensões do corpo-de-prova são denominadas logo após a extrusão ou compactação da argila, após o processo de secagem e após a queima, com o auxílio de um paquímetro. Seu valor é importante para o projeto do molde que será utilizado para a conformação da argila. O ensaio também permite identificar as deformações excessivas que poderão impedir que o componente cerâmico seja aprovado no ensaio de planeza das faces e desvio padrão em relação ao esquadro (KAZMIERCZAK, 2007).

Para o autor, tal propriedade é de grande importância no processamento de grandes peças, pois uma grande retração necessita de secagem muito lenta para evitar trincas e se obter as dimensões desejadas. Esse autor afirma que, geralmente, as argilas plásticas de granulometria fina têm retração mais elevada.

De acordo com Grim (1962) apud Tomazetti (2003) o aumento desta propriedade está relacionado com o aumento da água de plasticidade e, em alguns argilominerais, com a diminuição do tamanho das partículas. Argilominerais alongados e fibrosos tendem a ter grande retração de secagem, em função da perda de empacotamento de suas partículas.

Segundo Tomazetti (2003) quando ocorre a queima do bloco cerâmico há nova redução de volume, relacionada à perda da água de constituição, e à redução ou eliminação dos poros. Esta segunda retração é denominada retração de queima e Cardoso (1995) afirma que ela é consequência das reações físicas e químicas das argilas quando submetidas à ação do calor.

Para Grim (1962) apud Tomazetti (2003) a retração de queima varia com a distribuição do tamanho dos grãos, tendendo a aumentar com a quantidade de material com partículas de pequeno tamanho. Alguns constituintes dos argilominerais têm influência na retração de queima, tais como o quartzo, que em proporção considerável reduz o volume do produto cerâmico.

- Porosidade

A porosidade é função das características da argila utilizada e da umidade necessária para a sua moldagem. As dimensões das partículas lamelares dos argilominerais e as forças de atração existentes entre elas, associadas à quantidade de água existente na argila no momento da conformação, são fatores preponderantes para a definição da distribuição dos poros da cerâmica. Esses fatores associados à energia utilizada para moldagem e às alterações volumétricas decorrentes dos processos de secagem e queima da massa, definirão a distribuição de poros dos componentes de cerâmica vermelha.

A porosidade e a distribuição de poros são fatores determinantes de diversas propriedades da cerâmica: um aumento de porosidade resulta no acréscimo da

permeabilidade e na diminuição da resistência da massa específica e da condutibilidade térmica e elétrica. A porosidade é determinada segundo especificação da ABNT NBR 15270:2005, pela diferença de massa entre o corpo de prova saturado, após imersão em água, e sua massa após secagem em estufa. A distribuição de poros da cerâmica pode ser realizada com o auxílio de porosímetros. O mais utilizado é o porosímetro por intrusão de mercúrio, e o resultado do ensaio consiste numa curva de distribuição de poros da argila (KAZMIERCZAK, 2007).

Segundo Norton (1973) a porosidade de um corpo cerâmico é muito importante, pois serve como uma excelente medida de grau de sinterização em função da temperatura de queima. Esta propriedade mede o grau de vitrificação obtido na temperatura que o bloco cerâmico foi queimado, visto que, para uma mesma massa cerâmica, à medida que aumenta-se a temperatura de queima, diminuem-se os vazios entre os grãos, melhorando significativamente a resistência mecânica e outras características como o índice de absorção de água.

2.2.1.3 Ensaio visando a identificação da composição química e mineralógica da matéria-prima.

De acordo com KAZMIERCZAK (2007) a definição das propriedades de um material cerâmico é realizada por meio de diversos ensaios de caracterização. Alguns ensaios são realizados diretamente na matéria-prima, com o objetivo de se identificar se essa possui as propriedades necessárias para a moldagem e secagem de produtos cerâmicos. Os demais ensaios são realizados em corpos de prova que passaram por todas as etapas do processo de produção da cerâmica vermelha (preparo da massa, moldagem, secagem e queima).

Existem diversas técnicas para a identificação dos argilominerais em argilas ou massas. Um método rápido e preciso para a determinação da composição química de materiais cerâmicos é a análise por fluorescência de raios-X. Entretanto, em função do seu custo ser muito elevado, é comum se utilizarem outras técnicas. As técnicas mais usadas são a difratometria de raios-X, a análise térmica, a microscopia ótica e eletrônica, a

espectroscopia no infravermelho e a análise química. Para a identificação de argilas com elevado grau de pureza, o uso de uma dessas técnicas, como a difratometria de raios – X, já é suficiente. Nas outras argilas, o uso conjunto de varias técnicas é o único caminho para a correta identificação dos constituintes.

A difração de raios-X é um método que permite a identificação dos elementos constituintes da argila a partir de picos registrados em um difratograma. Em conjunto com uma análise química, pode-se estimar a composição mineralógica da argila. Um dado importante que pode ser obtido na análise é a determinação do grau de cristalinidade dos minerais argilosos, característica que influenciará no comportamento da argila durante o processo de fabricação.

A análise térmica consiste na análise de alterações em uma propriedade física ou química da argila quando submetida a um acréscimo controlado de temperatura. As principais técnicas de análise térmica utilizadas são:

- Análise Térmica Diferencial (ATD) que consiste na determinação da variação de temperatura entre a amostra e a argila e uma substancia de referencia, em um ciclo de aquecimento controlado. Os picos endotérmicos e exotérmicos, obtidos durante o ensaio permitem a identificação qualitativa das substâncias, enquanto sua área permite uma determinação quantitativa. O ensaio é de grande valia para a caracterização de argilas. A Termogravimetria é um ensaio complementar à ATD. Consiste na determinação da variação de massa de amostra de argila, em função do acréscimo de temperatura ao longo do tempo. A variação da massa é resultante de uma transformação física ou química e gera uma curva termogravimétrica, na qual se podem distinguir constituintes da argila. A termogravimetria derivada é a curva em que se visualiza a derivada da curva TG. Por esta curva, é possível determinar a temperatura em que a velocidade de uma determinada perda de massa atinge seu valor máximo e também estimar o valor de perda de massa ocorrido, a partir da área da curva.

- Análise Mecânica Térmica (AMT), realizada em dilatômetro, consiste na determinação das mudanças dimensionais de uma amostra de argila (após queima) e fornece dados sobre o coeficiente de expansão linear, sua contração ou expansão relativa em argilas.

2.2.2 - Chamote: Conceito e Pesquisas

Chamote pode ser definido como um subproduto proveniente de rejeitos de material cerâmico após a queima (DONDE et al.,1998). Na obtenção do resíduo há inicialmente necessidade de fragmentação das peças descartadas o que ocorre geralmente em moinhos de bolas ou de martelos.

Este material é considerado inerte até a sua temperatura de obtenção, e a partir daí, começa a reagir com a massa base do corpo cerâmico. O chamote pode ser considerado um dos materiais não plásticos eventualmente incorporados em massas para a produção cerâmica.

Ripolo Filho (1997) relata ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria para avaliar a utilização do Chamote - como Fator de Qualidade na Fabricação de Elementos Cerâmicos. O objetivo deste trabalho foi o de estudar a viabilidade da adição do chamote à argila para a fabricação de elementos cerâmicos.

O experimento envolveu a utilização de sete tipos de amostras obtidas em uma indústria cerâmica próxima à UFSM, as quais serviram para estudar as seguintes variáveis: teor de umidade de moldagem, proporção das misturas, argila-base e temperatura de queima. As principais características físicas e mecânicas observadas foram: retração linear de queima, absorção de água, porosidade, massa específica aparente e sucção inicial. A partir dessas observações o autor obteve as seguintes conclusões:

- Possibilidade de utilizar o chamote homogeneizado na fabricação de elementos cerâmicos, desde que em proporção ideal e queimado a temperatura adequada;
- As tensões de ruptura e absorção de água obtidas estão de acordo com aquelas previstas pelas normas brasileiras;
- A adição de chamote à argila contribui potencialmente para o controle da retração. Por fim, verifica-se que a adição de chamote à argila permite o

aproveitamento desse tipo de resíduo na fabricação de produtos de boa qualidade e contribui para reduzir a poluição ambiental.

Vieira, Souza e Monteiro (2004) procederam a uma análise mais minuciosa da microestrutura do compósito com a adição de chamote.

O chamote obtido de rejeitos de blocos queimados em baixas temperaturas adicionado em massa de cerâmica vermelha visou à obtenção de telhas. Inicialmente o chamote foi submetido a ensaios de caracterização química, física e mineralógica. Em seguida foram feitas adições de chamote a uma argila caulinítica nas proporções de 0, 5, 10 e 20% em massa.

O referido autor avaliou as seguintes propriedades físico-mecânicas: absorção de água, retração linear e tensão de ruptura à flexão. A microestrutura das composições foi avaliada através de ensaios de porosimetria de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura.

Os resultados indicaram que:

- A incorporação do chamote melhorou os parâmetros de secagem da cerâmica após a queima;
- A porosidade praticamente não sofreu variações significativas, o que indica que a queima de chamote em temperaturas superiores àquela em que ele foi obtido, propicia sua própria sinterização e não ocasiona alterações degenerativas na microestrutura das cerâmicas queimadas.

Já Campelo et al (2006) realizaram pesquisas com a adição de chamote, oriundo de restos de telhas, para o mesmo fim que o autor anterior, nas proporções 3% e 5% de adição em massa.

Os corpos de prova foram queimadas em diferentes temperaturas 850°C e 950°C e foram submetidos a ensaios de módulo de ruptura à flexão em três pontos, taxa de absorção d'água e retração linear, e permitiram concluir que:

- Em ambas as temperaturas de queima experimentadas pelos corpos de prova a adição de 3% e 5% de chamote à massa, provocaram aumento na absorção de água.
- Em ambas as temperaturas de queima experimentadas pelos corpos de prova a adição de 3% e 5% de chamote à massa, provocaram diminuição no módulo de ruptura à flexão.
- A adição de 3% e 5% de chamote à massa cerâmica para as duas temperaturas de queima diminuiu os valores da retração linear, ou seja, a adição de chamote ajuda no controle dimensional das peças.

Souza Santos (1989) sugere que para facilitar o processamento cerâmico podem ser introduzidas outras argilas, que apresentam um maior teor de impurezas associadas aos argilominerais, reduzindo a plasticidade da massa. Assim, adicionando-se desplastificantes na massa cerâmica, com a função de inerte, ocorre a diminuição do alto grau de compactação da mesma, com posterior redução da plasticidade das argilas.

De acordo com Pracidelli e Melchiades (1997) a adição de não-plásticos às argilas reduz a sua interação com a água, causando pontos de descontinuidade nas forças de coesão entre as partículas. Os pontos de descontinuidade produzem poros, que permitem a passagem da água do interior até a superfície da peça, tornando fácil a secagem das massas. Desta forma, no secador, há redução do ciclo de secagem devido a facilidade de saída da água, com menores gradientes de umidade.

Facincani (1992) apud Vicenzi (1999) investigou as conseqüências da adição de diversos tipos de não-plásticos em massas cerâmicas e considera que os desplastificantes são geralmente constituídos de grãos que permanecem inertes na fase de secagem e reagem na queima formando novos componentes. Como desplastificantes pode-se usar:

- i) Areias, preferencialmente sem carbonatos, de granulometria compreendida entre 50 e 500 μm ;
- ii) Chamotes de granulometria compreendida entre 80 e 800 μm ;

- iii) Serragem de madeira, para a obtenção de alta porosidade no produto final, diminuindo sua resistência mecânica, mas melhorando as características de isolamento térmico;
- iv) Cinzas volantes, material inerte como as areias, procedentes de fornos de centrais termoelétricas;
- v) Materiais argilosos queimados a aproximadamente 600°C a 700°C. Nestas temperaturas a argila perde parte de sua reatividade com a temperatura e se comporta como material inerte na secagem. Durante a queima reage com o material restante e favorece ao aumento da resistência mecânica.
- vi) Materiais argilosos magros, suprimindo carência destes no jazimento.

Facincani (1992) apud Vicenzi(1999) cita ainda que normalmente utiliza-se os não-plásticos para reduzir: excessiva contração na secagem; nudosidades e estruturas devidas à moldagem; formação tanto de fissuras na secagem, como de escamações e inchamento na queima; coração negro. Porém, seu emprego pode acarretar inconvenientes, como:

- i) Diminuição da resistência mecânica de secagem e de queima, devido à descontinuidade introduzida na cadeia dos elementos aglomerados. Existe portanto um limite de adição destes materiais, determinado pela mínima resistência admissível no produto seco e queimado;
- ii) Contrações do material no forno durante o esfriamento e fissuras capilares, no emprego de desplastificantes silicosos;
- iii) Ação abrasiva dos componentes inertes silicosos nas partes metálicas dos equipamentos.

Observando-se as relações tratadas por Facincani (1992) apud Vicenzi (1992), pode-se destacar que as partículas de não-plásticos adicionadas à massa cerâmica devem apresentar uma distribuição granulométrica adequada. E, segundo Pracidelli e Melchiades (1997), esta deve ser superior a 60µm e usadas em quantidades moderadas. Além disso, outros cuidados devem ser tomados quando da adição de não-plásticos em massas cerâmicas: homogeneizar bem a massa; esfriar lentamente o produto queimado; adicionar moderadamente o desplastificante, para não afetar a resistência mecânica do produto após a secagem e a queima.

Um fator fundamental apontado na utilização de aditivos não-plásticos em massas cerâmicas é a composição granulométrica da massa. Para uma maior orientação desta propriedade física, pode-se utilizar como ferramenta o Diagrama Ternário de Winkler (1954). A Figura 2.4 apresenta o Diagrama Ternário de Winkler, mostrando as áreas de distribuição granulométrica ótimas para alguns produtos de cerâmica vermelha.

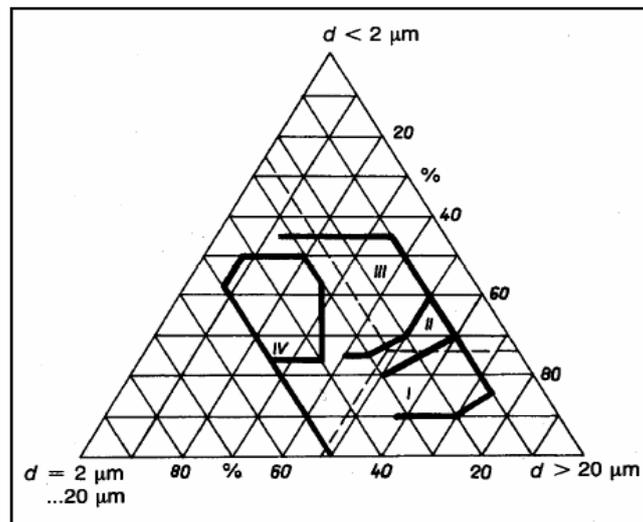


Figura 2.5 - Classificação Ternária do Diagrama de Winkler de produtos argilosos, baseado na distribuição granulométrica de grãos e partículas em relação ao uso prático das matérias-primas. (I) tijolos sólidos; (II) tijolos perfurados; (III) telhas; (IV) produtos de parede (Fonte: SOUZA SANTOS, 1989)

É necessário o controle adequado da composição granulométrica de massas cerâmicas. O excesso de materiais plásticos ou não-plásticos acarreta problemas ao processamento, bem como ao produto final.

Assim, em composições para a fabricação de blocos cerâmicos, os não-plásticos estão incluídos normalmente nas argilas vermelhas usadas, e raramente são realizadas as adições de outras matérias-primas. A inclusão de chamote, do próprio material, na massa cerâmica vermelha vem sendo utilizada por alguns pesquisadores.

3 – O PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BLOCO CERÂMICO

A produção do bloco cerâmico consiste em várias fases, desde a escolha da argila e a sua extração, até a obtenção do produto final. Estas fases são: preparação da matéria-prima, moldagem da massa cerâmica e tratamento térmico.

De acordo com a ABNT NBR 15270-1:2005, os blocos cerâmicos devem ser fabricados por conformação plástica (processo de extrusão ou prensagem) de matéria-prima argilosa, contendo ou não aditivos, e queimados a elevadas temperaturas.

O alcance dos requisitos referenciados pelas normas vigentes está intimamente relacionado aos cuidados tomados em todas as etapas envolvidas, e na qualidade dos materiais empregados. O fluxograma do processamento típico de blocos cerâmicos está esquematizado na Figura 3.1. Destacam-se a etapa de secagem e os pontos de descartes de peças.

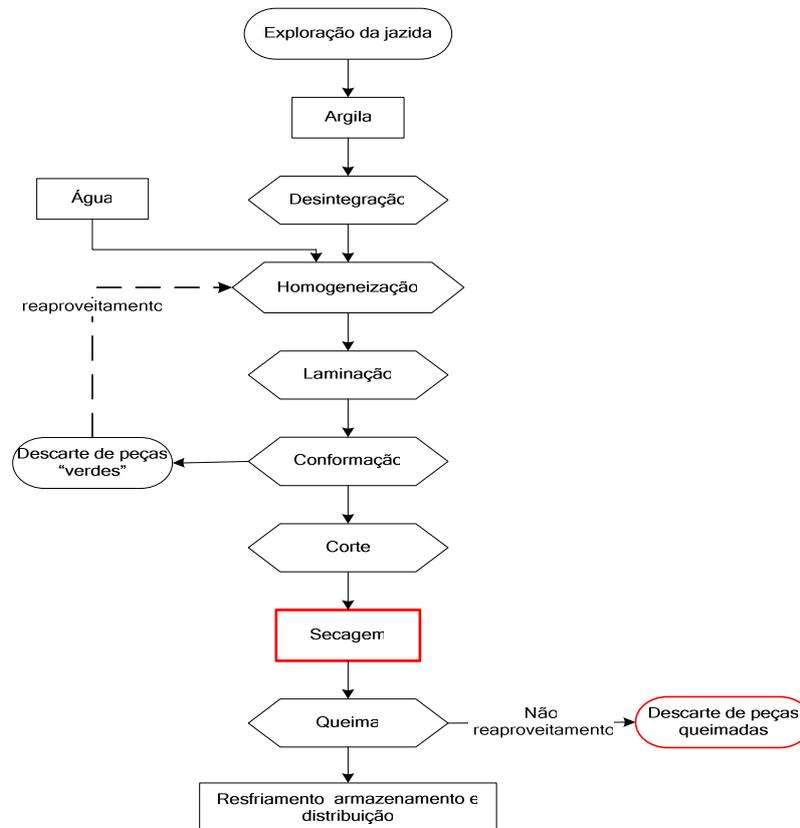


Figura 3.1. Fluxograma do processo típico da produção de blocos cerâmicos

O controle do processo de produção minimiza o aparecimento de defeitos no componente final. Esses defeitos serão comentados mais adiante de acordo com cada etapa do processo.

3.1 - EXPLORAÇÃO DA JAZIDA

Grande parte das matérias-primas utilizadas na produção de blocos cerâmicos é natural, encontrando-se em depósitos espalhados na crosta terrestre. Em geral, a extração das argilas é realizada a céu aberto, antecedida de estudos preliminares (testes de análise química, difração de raios-X, plasticidade, entre outros) para a caracterização tecnológica do material. Os meios auxiliares de que se dispõem para extração e transporte das argilas até o local de estocagem vão desde equipamentos rudimentares até equipamentos mecanizados de grande porte (MORAIS, 2007). Entretanto, na maioria das vezes esses estudos preliminares são negligenciados pelos proprietários das indústrias.

Petrucci (1998) afirma que a melhor maneira de se conduzir a extração das argilas, de uma maneira geral, é com a formação das rampas, as quais facilitam tanto o escoamento da água quanto a retirada do material não aproveitado, porém nem sempre a topografia do local permite, o que torna necessário o emprego de uma outra maneira, como a escavação de buracos.



Figura 3.2 – Extração de argila para produção de blocos cerâmicos (Fonte: MORAIS, 2006)

3.2 - TRATAMENTO DAS ARGILAS

O tratamento da argila compreende os processos de sazonalamento, homogeneização, obtenção da umidade adequada e laminação da massa cerâmica.

Segundo Petrucci (1998) a primeira etapa do tratamento é denominada sazonalamento. Consiste em submeter à argila recém-extraída à ação dos agentes atmosféricos, em período que normalmente varia de seis meses a dois anos, quando são eliminadas as impurezas prejudiciais ao material. As argilas são depositadas em camadas, nas quais sua espessura e alternância dependem dos tipos utilizados e das propriedades desejadas da mistura final. A exposição às intempéries provoca a lavagem dos sais solúveis, a fermentação e a oxidação da matéria orgânica, prática que melhora a plasticidade das argilas, facilitando a moldagem por extrusão. Além disso, evita a expansão das peças logo após a moldagem, com ocorrência de deformações, trincas e rupturas dos produtos na fase de secagem, e o desenvolvimento de gases durante a queima.



Figura 3.3 - Sazonamento (Fonte: SPOSTO, MORAIS E PEREIRA, 2006)

Após o sazonalamento, a matéria-prima é transportada para o caixão alimentador, onde, se necessário, é feita a dosagem que deve seguir com rigor as proporções previamente estabelecidas. A mistura dosada é conduzida ao desintegrador, onde os torrões são desintegrados. Em seguida, o material é transportado para o misturador, onde se processa a homogeneização e o ajuste final adicionando água, quando necessário. E por fim, a mistura é transferida para o laminador que tem a função de executar uma pré-laminação e completar a homogeneização (MORAIS, 2006).

Petrucci (1998) ressalta que adição de água merece atenção devida, pois ela pode influenciar, dependendo da quantidade adicionada, de forma negativa nas próximas etapas do processo de produção. O teor de água adicionado varia diretamente com o tipo de conformação ao qual o produto será submetido.



Figura 3.4 – Preparo da argila para fabricação de blocos cerâmicos. a) homogeneização; b) laminação.(MORAIS, 2006)

3.3 - CONFORMAÇÃO E CORTE

O método de conformação (moldagem) usado deverá ser escolhido em função do produto requerido (blocos de vedação, blocos estruturais, telhas, etc) e da umidade presente no material.

Norton (1973) cita o método de prensagem a seco – nesse método o teor de umidade usado é muito baixo (menor que 10%) e a pressão exercida é bastante alta. Geralmente esse método é usado para moldagem de ladrilhos, azulejos, refratários, além de tijolos e telhas de melhor qualidade.

Outro método existente é o de conformação por extrusão. Morais (2006) afirma ser o método mais utilizado pelas indústrias cerâmicas, onde a massa cerâmica é moldada na forma de uma pasta plástica, porém rígida, em um equipamento denominado extrusora (ou maromba), composta de uma rosca-sem-fim que comprime a mistura ao passar por uma chapa de aço perfurada.

Em seguida, o material é picado, caindo na câmara de vácuo, onde é processada a desaeração (remoção do ar para a criação de um vácuo na extrusora) . Logo abaixo dessa câmara, outra rosca-sem-fim força a massa através do molde (ou boquilha), que imprime o formato predefinido formando uma coluna contínua, que é cortada no comprimento desejado.

A Figura 3.5 ilustra uma vista dos equipamentos utilizados na fase de moldagem e corte de blocos cerâmicos.



(a)

(b)

Figura 3.5 – Produção de blocos cerâmicos na indústria estudo de caso. a) boquilha de moldagem; b) mesa de corte

3.4 - SECAGEM

Trata-se de uma etapa importantes no processo produtivo de blocos cerâmicos devido a algumas peculiaridades que serão abordadas neste item.

Segundo Petrucci (1989), a secagem tem a finalidade principal de eliminar parte da água inserida na peça durante o processo de mistura e laminação.

De acordo com Van Vlack (1973) as argilas que contêm partículas menores em sua composição necessitam de uma quantidade maior de água para adquirir plasticidade. Isto ocorre devido essas partículas possuírem uma área específica maior. Sendo assim, as matérias – primas que contêm partículas maiores em sua composição como, por exemplo, um alto teor de quartzo, não necessita de uma grande quantidade de água,

desde que possua plasticidade suficiente, fazendo com que o teor de umidade não seja elevado na etapa de secagem.

É justamente o teor de umidade no qual se encontra a peça o que mais importa na etapa de secagem. Por esse motivo faz-se um melhor entendimento da quantidade de água que cada tipo de conformação necessita.

A massa cerâmica submetida à extrusão necessita de uma quantidade maior de água, pois de outra forma não se consegue homogeneidade do material. Já na peça prensada, a massa pode ficar homogênea devido à grande pressão exercida pela máquina, compensando a baixa plasticidade, sem que seja necessária uma quantidade maior de água (OLIVEIRA, 2002)

Van Vlack (1973) explica que a água depositada entre as partículas das peças cerâmicas deve ser eliminada na etapa de secagem pois no início da etapa de queima essa água provoca fissuras indesejáveis nos produtos. Quanto maior for o teor de umidade numa peça, maior será sua retração.

Beltran et al (1995) assinala ainda que a água de conformação pode ser dividida em dois tipos: o primeiro é denominado de água intersticial. O segundo é denominado de água livre ou água de plasticidade. A água intersticial está relacionada com a água necessária para preencher os poros das partículas. Já a água de plasticidade localiza-se entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando a trabalhabilidade no processo de conformação. É este último tipo de água que é responsável pela retração das peças.

Sendo assim, os defeitos mais comuns provocados pela retração são: deformações, empenamentos e fissuras (CARDOSO, 1995).

Van Vlack (1973) observa que na etapa de secagem a zona de maior umidade (interior) é submetida a uma tensão de compressão e a zona de menor umidade (no caso a externa) é submetida a uma tensão de tração, o que explica o aparecimento de alguns defeitos. E uma das maneiras para se evitar este tipo de problema é a operação de um controle de secagem.

- Secagem natural

A secagem natural consiste na utilização exclusiva de agentes atmosféricos, tais como o ar e a luz solar, sem uso algum de equipamentos que promovam esta secagem, conforme a Figura 3.6.



Figura 3.6 – Secagem natural de blocos cerâmicos (SPOSTO, MORAIS E PEREIRA, 2006)

Cardoso (1995) adverte que a secagem natural é essencial, porque se o bloco for levado ainda úmido à estufa de secagem (secagem artificial) ou ao forno (fase de queima), a água contida no seu interior ficará retida pela retração da camada externa, e conseqüentemente, provocará tensões diferenciais internas, causando defeitos e até prejuízo com a perda do produto.

Porém um estudo realizado por Sposto, Morais e Pereira (2006) em algumas indústrias que abastecem o mercado do Distrito Federal, revela que as mesmas apesar de realizarem secagem natural e artificial, esta se mostrou ineficiente, devido principalmente a falta de controle de temperatura, da umidade relativa do ar e do tempo de secagem. Na Figura 3.7 é apresentada uma vista do problema mencionado.



Figura 3.7 - Heterogeneidade na secagem do bloco, devido a falta de controle de temperatura, umidade relativa do ar e tempo na secagem (SPOSTO, MORAIS E PEREIRA, 2006)

- Secagem artificial

A secagem artificial é feita através da utilização de artifícios que promovem a evaporação da água, tais como: a) utilização de gases quentes, promovendo assim a evaporação da umidade; b) utilização de ventilação para promover a remoção do ar saturado.



Figura 3.8. – Secagem artificial em blocos cerâmicos. a) secagem por meio de gases quentes e b) secagem por meio de ventiladores de teto

3.5 - QUEIMA DE BLOCOS CERÂMICOS

Alguns autores como Bauer (2000), Souza Santos (1989) e Norton (1973), afirmam que a fase de queima constitui a operação mais importante na fabricação de blocos cerâmicos.

Conforme Petrucci (1998) e Bauer (2000), esta fase é complexa, onde ocorrem reações químicas importantes, proporcionando aos blocos características finais, tais como: resistência mecânica e cor, dentre outras. Os principais aspectos que influenciam a queima são: a temperatura, o tempo de queima, a velocidade de aquecimento e de resfriamento, a atmosfera ambiente, o tipo de forno e o combustível utilizado, entre outros.

Petrucci (1998) comenta que não existe tempo e curva de temperatura de queima típica para todas as argilas, uma vez que estas variam de acordo com o tipo de forno, tipo de argila, eficiência do processo de queima, distribuição do calor na câmara de queima,

condições ambientais e geometria dos blocos a serem queimados. A combinação do tempo total de queima com a temperatura, além de ser importante na qualidade do bloco, tem influência significativa no consumo de combustível utilizado durante a queima.

Se a queima for lenta, os defeitos em grande parte são eliminados, porém há gasto excessivo de combustível. A queima rápida é economicamente interessante, entretanto, pode comprometer a qualidade do produto. Por outro lado, baixas temperaturas ou curto período de queima, contribuem no surgimento de blocos crus, principalmente em alguns pontos mais frios da câmara de queima.

Segundo Van Vlack (1984), o princípio da queima consiste na redução dos poros entre as partículas e uma simultânea contração do bloco, combinada com o aumento da união e da resistência de ligações químicas entre partículas adjacentes quando aquecidas em altas temperaturas.

A sinterização é o ponto de integração máxima dos minerais da argila durante a queima. Ultrapassando este estágio os blocos cerâmicos entram em desintegração e se fundem, derretendo e se tornando uma pasta.

Quanto aos fornos utilizados na queima de blocos, os mesmos podem ser classificados em periódicos (ou intermitentes) e contínuos. De acordo com Souza (1997) existe ainda um outro tipo de forno classificado como semicontínuo. Porém, este tipo de forno nada mais é do que a junção de vários fornos intermitentes.

- Forno intermitente de chama invertida

Os fornos mais usados nas indústrias cerâmicas brasileiras e da região em estudo de menor porte são os intermitentes de chama invertida. Nesses fornos, os gases quentes penetram na parte superior da câmara de queima, atravessam as peças e saem através de grelhas que conduzem a canais subterrâneos ligados a uma chaminé, que promove a saída dos gases (OLIVEIRA, 2002).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.9 – Forno periódico de chama invertida. (a) detalhe da abóbada; (b) detalhe da porta; (c) detalhe da fornalha. (Fonte: MORAIS, 2006)

De acordo com Santos (2001) e Cardoso (1995), das principais vantagens dos fornos periódicos, comparados aos contínuos, destacam-se:

a) espaços menores de instalação; b) concepção simples e execução fácil e rápida; c) menor custo de instalação; d) maior flexibilidade da produção, podendo adaptar-se com facilidade à flexibilidade do mercado consumidor e queimar peças distintas e com diferentes parâmetros de queima e; e) manutenção sem parada da produção.

Para as desvantagens os autores apontaram:

a) elevado consumo de combustível ou baixo rendimento térmico, em virtude da grande quantidade de calor necessária, a cada ciclo de queima, para aquecer a estrutura do forno, e a perda de calor pelas paredes, abóbada e gases de exaustão da chaminé; b) baixa produtividade; c) distribuição não uniforme de temperatura; d) maior consumo de mão-de-obra; e) maior dificuldade de automação da produção; f) maior desgaste da

estrutura, em virtude das variações sucessivas de calor e frio e; g) excesso de manuseio nos blocos cerâmicos.

- *Fornos contínuos*

Os fornos contínuos são equipamentos térmicos em que o ciclo de queima é realizado sem interrupção, isto é, enquanto a queima dos blocos cerâmicos de uma vagoneta (carro transportador) chega ao final, outra está sendo iniciada, sem descontinuidade (MORAIS, 2006). Segundo Santos (2001) os tipos de fornos contínuos utilizados na indústria de cerâmica vermelha são: forno hoffman de galeria longitudinal, forno hoffman de galeria transversal, forno túnel convencional; forno túnel de queima rápida e forno a rolos. Destes fornos, o mais utilizado é o forno contínuo convencional.

De acordo com Santos (2001) e Norton (1973), o forno tipo túnel, inventado em 1877, é o equipamento térmico mais utilizado pelas grandes indústrias de cerâmica vermelha por apresentar maior capacidade produtiva e melhor rendimento energético. Como o próprio nome indica, é constituído por um túnel, subdividido em três zonas, a saber: zona de preaquecimento, zona de queima e zona de resfriamento, havendo o aproveitamento de calor de uma zona para outra. Os blocos são colocados sobre vagonetas, que se move sobre trilhos, ao longo do comprimento do túnel, empurrada por meio de um sistema hidráulico automático.

Normalmente, dois quintos do comprimento total deste tipo de forno são reservados à zona de preaquecimento, um quinto à zona de queima e outros dois quintos à zona de resfriamento. Podem ser construídos de alvenaria convencional ou pré-fabricada (Santos, 2001). A Figura 3.10 ilustra um forno tipo túnel.



(a)



(b)

Figura 3.10 – Forno contínuo tipo túnel. a) entrada da zona de preaquecimento; b) saída da zona de resfriamento (MORAIS, 2007).

3.6 PERDAS APÓS A QUEIMA E GERAÇÃO DO CHAMOTE

De acordo com Rocha (2006) sempre existirão perdas nos processos, mas, suas ocorrências precisam estar dentro de certos limites, não devendo ultrapassar um nível de aceitabilidade.

Segundo Soibelman (1993), as perdas podem ser classificadas:

- De acordo com o controle:
 - Perdas evitáveis (decorrente do emprego inadequados dos materiais e componentes, roubos, vandalismos...);
 - Perdas inevitáveis (sinônimo de perda natural).

- De acordo com a natureza:
 - Perdas de natureza aparente, também denominada por diretas (são verificadas quando um material é danificado, não podendo ser recuperado ou utilizado, ou quando o mesmo é perdido durante o processo de construção); É exatamente este tipo de perda que dá origem aos entulhos de construção;
 - Perdas de natureza oculta, também denominadas por indiretas (é a perda econômica resultante da utilização do material em excesso ou de forma diferente da prevista). Neste tipo de perda, os materiais não são perdidos fisicamente. Alguns exemplos destas perdas são:
 - perda por substituição – causada pela utilização de um material de valor superior àquele que foi especificado
 - perda por negligência – causada pela utilização excessiva de um material sem que o construtor tenha um ressarcimento do custo adicional;
 - perda por produção – se deve à ocorrência de situações imprevistas, e portanto, não orçadas.

- De acordo com a incidência:
 - As perdas de materiais podem ocorrer em diferentes etapas do processo de produção, desde o transporte externo, passando pelo recebimento, estocagem, transporte interno, até chegar ao momento de suas aplicações.

Em relação ao chamote, tem-se que este está diretamente relacionado com as perdas geradas no processo de produção de blocos, e quanto maior for o controle de qualidade deste processo, menor será o seu percentual gerado. Observa-se que nos fornos intermitentes, os mais utilizados na região e na indústria em estudo, porém, este percentual é relativamente elevado, devido às próprias características do processo de queima (artesanal, com ausência de uniformidade de temperaturas de queima).

Alguns pesquisadores realizaram estudos sobre a adição de chamote à massa cerâmica e quantificaram as perdas geradas no processo de fabricação de elementos cerâmicos.

Seye et al (2003) realizaram um levantamento sócio-econômico-patrimonial em oito olarias dos municípios Iranduba e Manacapuru – AM , e concluíram que a perda de produtos queimados (“chamote”) variava entre 3% e 5% da produção, dentro da média nacional, levando a crer, então, que o desperdício de material cerâmico no pólo é de 9600 t/ano, considerando-se uma massa média de 2 kg para o tijolo queimado e perda de 4%. Estes resíduos ficam armazenados nos pátios das olarias, ou são depositados em lugar inadequado, gerando problemas ambientais. Para Costa (2003) de cada 1 m³ de material reciclado, um 1 m³ de material não estará ocupando local em aterro controlado ou similar, além de que um 1 m³ deixará de ser extraído do meio ambiente, como matéria-prima.

Ademais, de acordo com Alves e Baldo (1997), o aproveitamento de rejeitos industriais cerâmicos pode ter um leque variado de opções, na forma de pó, como por exemplo, sua aplicação em massas cerâmicas, como redutores de plasticidade, ou como agentes formadores de fase vítrea em blocos cerâmicos, revestimentos, grés e produtos de baixa absorção de água, com grande valor econômico agregado.

Vieira et al (2004) constatou que em Campos dos Goytacazes as indústrias cerâmicas que adotam critérios de controle de qualidade apresentam uma perda na etapa de queima entre 0,5% e 1%. Entretanto, algumas cerâmicas chegam a apresentar 10% de perda da produção somente na etapa de queima. Normalmente os rejeitos de peças queimadas são depositados no próprio pátio das indústrias ou no acostamento ao longo da rodovia que margeia a maior parte das indústrias.

Na indústria onde se coletaram os rejeitos de blocos cerâmicos, as perdas foram estimadas em torno de 1,2% da produção mensal. Um valor considerável, já que esta indústria tem por produção mensal 450000 blocos.

O reaproveitamento do chamote torna-se uma alternativa barata e sustentável, porém a quantidade de resíduo a ser adicionado à massa cerâmica precisa ser avaliada para não prejudicar o processo de queima das peças, pois, de acordo com Campelo et al (2006) quanto maior a quantidade de resíduo queimado adicionado à massa cerâmica, maior será a temperatura de gresificação da peça.



Figura 3.11 – Resíduos de blocos cerâmicos depositados na industria cerâmica selecionada

4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, foram definidas as variáveis de estudo – variáveis dependentes e independentes – de acordo com o objetivo da pesquisa que é comparar as propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova sem adição e com adição do chamote.

Como variáveis independentes, têm-se as composições de argila-chamote estabelecidas e diferentes temperaturas de queima dos corpos-de-prova.

As variáveis dependentes estão relacionadas com os ensaios tecnológicos realizados em laboratório para determinação das propriedades físico-mecânicas, sendo estas, retração linear na secagem e na queima, absorção de água, porosidade aparente, massa específica e tensão de ruptura à flexão.

No fluxograma da Figura 4.1 são apresentadas as variáveis estudadas nesta pesquisa.

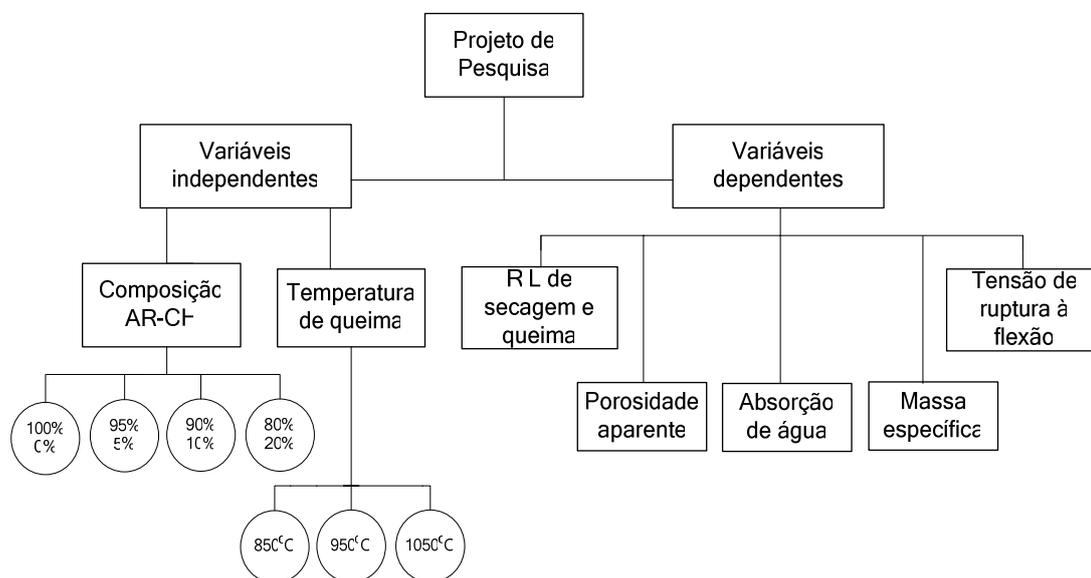


Figura 4.1 Esquema das variáveis de estudo

Neste capítulo apresenta-se o procedimento experimental adotado para o alcance dos objetivos desta dissertação. O fluxograma da Figura 4.2 contempla as seguintes etapas: coleta das matérias-primas; caracterização das matérias-primas; definição das composições de argila e chamote; conformação dos corpos de prova e queima e determinação das propriedades físico-mecânicas.

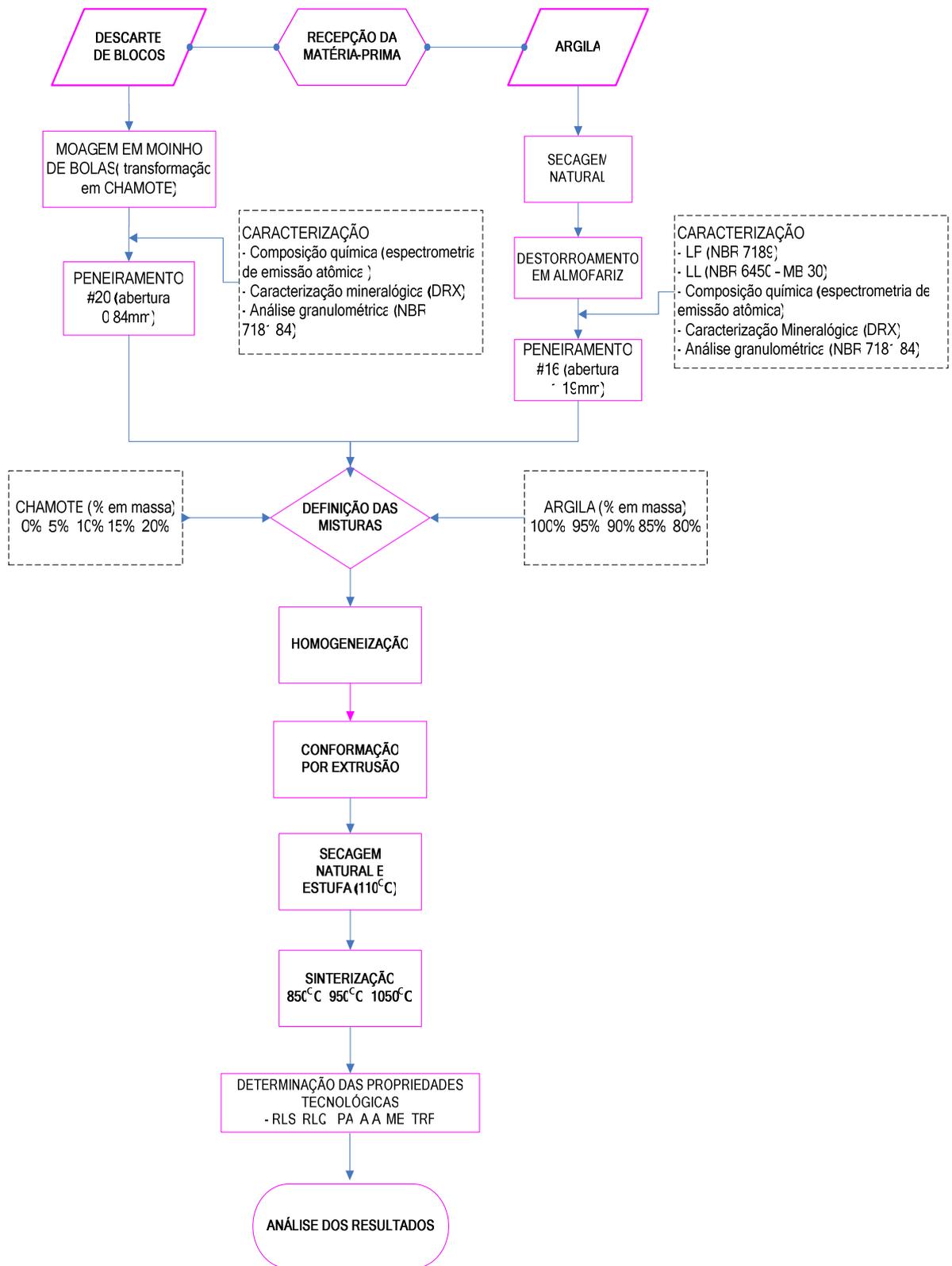


Figura 4.2 – Fluxograma representativo da produção e queima dos corpos de prova

4.1. COLETA DA MATÉRIA - PRIMA

As matérias primas utilizadas foram a argila e o chamote provenientes de uma Indústria Cerâmica localizada em Petrolina - GO. O chamote foi obtido do descarte de blocos cerâmicos queimados em temperatura de aproximadamente 800°C e triturados em moinho de bolas.

A coleta da argila foi realizada diretamente no caixão alimentador da própria indústria, em quantidade suficiente para o preparo dos corpos de prova e realização dos ensaios, Figura 4.3. Observa-se que a argila coletada já havia passado por processo de sazonalamento.



Figura 4.3 – Vista da argila coletada no caixão alimentador da indústria em estudo

A coleta do resíduo foi realizada com base na ABNT NBR 10007:2004, para o resíduo em estudo. De acordo com a ABNT NBR 10.007:2004 a amostra de resíduo sólido em estudo deve ser obtida através de um processo de amostragem que garanta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo.

A metodologia de coleta adotada para o chamote é baseada na Tabela 4.1 e 4.2 que sugere os tipos de amostradores e os pontos de amostragem. O amostrador escolhido foi a Pá manual. A amostragem, por sua vez, foi definida em função do tipo de recipiente adotado para a armazenagem do resíduo na indústria cerâmica, buscando obter uma amostra o mais representativa possível.

Tabela 4.1 – Recomendações de amostradores de resíduos e indicação do amostrador escolhido para a coleta do chamote, de acordo com a ABNT NBR10004:2004.

Tipo de resíduo	Amostrador recomendado	Limitações/recomendações
Líquidos ou lodos em tambores, caminhões-tanques, barris ou recipientes similares	Amostrador de resíduo líquido: - polietileno - vidro	Não usar para profundidades > 1,5m Não usar resíduos incompatíveis com o material, tais como solventes Não usar vidros para resíduos contendo ácido fluorídrico ou soluções alcalinas concentradas
Líquidos ou lodos em tanques abertos ou lagoas	Caneca amostrada ou balde de inox	Afundar e retirar o amostrador suavemente para evitar que o tubo de duralumínio se amasse Não realizar amostragem em profundidade
	Garrafa amostradora pesada Garrafa amostradora de profundidades “Van Dorn”	A garrafa pode ser de uso problemático em líquidos muito viscosos
Sólidos em pó ou granulados em sacos, tambores, barris, ou recipientes similares, montes ou pilhas de resíduos	Amostrador de grãos	Utilizar para sólidos com partículas de diâmetros <0,6cm
	Amostrador “trier”	Não é recomendado para materiais muito secos
Resíduos secos em tanques rasos e sobre o solo	Pá	Não usar para amostras a mais de 8cm de profundidade
Resíduos secos em tanques rasos ou no solo, a mais de 20 cm de profundidade	Trado	-
Resíduos em tanques de armazenagem	Garrafa amostradora pesada Garrafa amostradora de profundidades “Van Dorn”	Pode ser de uso problemático em líquidos muito viscosos
1) Outros amostradores podem ser utilizados, desde que atendam às condições mínimas necessárias para garantir a integridade da amostra.		

Tabela 4.2 – Recomendações sobre os pontos de amostragem para a coleta de resíduos e indicação do ponto de amostragem, conforme a ABNT NBR1007:2004.

Tipo de recipiente	Ponto de amostragem
Tambor ou contêiner com abertura na parte superior	Retirar a amostra através da abertura
Barris ou recipientes similares	Retirar as amostras de pela parte superior dos barris, barrilhetes de fibras e similares Coletar as amostras de toda a seção vertical, em pontos opostos e em diagonal, passando pelo centro do recipiente (Ver Figura A1)
Sacos e similares	Retirar as amostras pela parte superior, evitando fazer furos adicionais por onde o material possa vazar Coletar as amostras de toda a seção vertical, em pontos opostos e em diagonal, passando pelo centro do recipiente (ver Figura A1)
Caminhões-tanque e similares	Retirar as amostras através da abertura superior do tanque. Se for necessário retirar a amostra de sedimentos através da válvula de purga Se o tanque for compartimentado, retirar as amostras de todos os compartimentos
Lagoas e tanques abertos	Dividir a área superficial em uma rede quadriculada imaginária. De cada quadrícula, retirar as amostras de maneira que as variações do perfil sejam representadas
Montes ou pilhas de resíduos	Retirar as amostras de pelo menos três seções (do topo, do meio e da base). Em cada seção devem ser coletadas quatro alíquotas, equidistantes. O amostrador deve penetrar obliquamente nos montes ou pilhas (ver Figura 4.1)
Tanque e/ou contêiner de armazenagem	Retirar as amostras através de abertura própria. Para tanques e/ou contêiner com profundidades superiores a 1,5m, retirar as amostras de maneira que as variações do perfil sejam representadas
Leitos de secagem, lagoas secas ou solo contaminado	Dividir a superfície em uma rede quadriculada imaginária. De cada quadricula retirar uma amostra representativa de área contaminada
<p>1) Sempre que poder, proceder ao espalhamento do monte ou pilha, efetuando a coleta de amostra por quarteramento.</p> <p>2) Deve-se proceder ao desmonte da pilha ou do monte, caso o amostrador não esteja adequado às condições e dimensões para a coleta de amostra.</p>	
<p>NOTA O número de quadrículas é determinado pelo número desejado de amostras a serem coletadas nas quais, quando combinadas, dão uma amostra representativa dos resíduos.</p>	

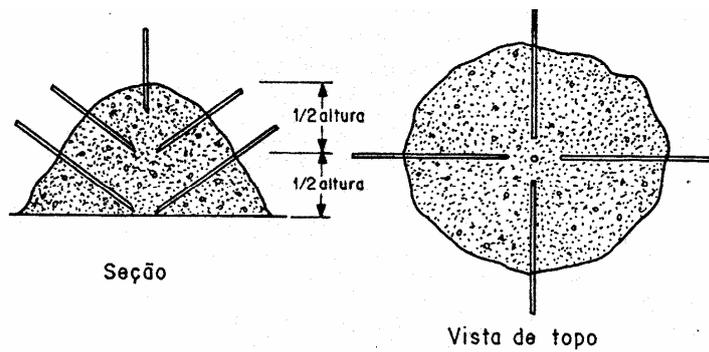


Figura 4.4 – Detalhe da coleta em monte ou pilha (seção e vista do topo). (Fonte: NBR 1007:2004)



Figura 4.5 - Coleta do resíduo de blocos na indústria cerâmica selecionada. (a) Coleta segundo a ABNT NBR1007:2004; (b) Acondicionamento do resíduo

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias-primas foram caracterizadas segundo as suas composições químicas e mineralógicas. Posteriormente foram determinadas suas propriedades físico-mecânicas.

Na Figura 4.6 é apresentada uma vista dos materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova.



Figura 4.6 Vista do chamote e da argila utilizados para os ensaios

4.2.1 Composição Química

Um dos métodos mais utilizados para a determinação da composição química de materiais é o da espectrometria por fluorescência de raios-X que determina qualitativamente e quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da incidência de raios-X que excitam as camadas eletrônicas da amostra. Esta última emite um novo espectro de raio-X característico de cada elemento de sua composição. Observa-se que esta técnica é não-destrutiva para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos, pós, etc.

Entretanto, para a análise da composição química da argila e do chamote neste trabalho, o método utilizado foi da decomposição por fusão total com metaborato de lítio, uma vez que não se dispunha de espectrômetro na instituição.

4.2.2 Composição mineralógica

A composição mineralógica dos materiais foi identificada por difração de raios-X (DRX). Essa análise consistiu em quatro varreduras distintas: uma da amostra total e três da fração argila: orientada e seca ao ar, solvatada em etileno glicol e aquecida.

A amostra total foi destorroada. Fez-se então a montagem em lâminas de alumínio vazadas.

A separação da fração argila foi realizada por dispersão em água utilizando-se 15 gramas da amostra destorroada. Para aumentar a velocidade de sedimentação da amostra foi centrifugada sob 750 rpm, durante 7 min. Frações maiores que da argila decantaram

enquanto esta permaneceu em suspensão. Este material suspenso foi submetido à centrifugação a 1500 rpm, por 30 minutos, sendo utilizado na preparação de uma lâmina com amostra orientada.

Após a secagem da lâmina, foi realizada a solvatação com etileno-glicol por cerca de 12 horas, favorecendo a entrada do composto nos espaços intercamada dos minerais expansivos, permitindo a verificação do possível aumento das distâncias interplanares.

Por fim, a lâmina foi submetida ao aquecimento de 490°C em mufla, por 3:30 h. Após este tempo procedeu-se à análise da amostra para a verificação das mudanças da posição dos picos, pela perda do material do sítio intercamada, ou o colapso da estrutura de alguns minerais.

As análises mineralógicas foram realizadas no Laboratório de Raios X do Instituto de Geociências da UnB utilizando-se um equipamento RIGAKU D/MAX – 2/C operando com tubo de cobre, sob voltagem de 35 kv e 15 mA, velocidade de varredura de 2°/minuto, no intervalo de 2° a 80° - 2 θ (para as amostras total e fração argila) e de 2° a 40° - 2 θ teta (para as amostras solvatadas com etileno glicol e aquecida).

As interpretações dos difratogramas e identificações dos minerais ocorreram no mesmo Laboratório. Utilizou-se o *software* JADE 3.0 para *Windows, XRD Pattern Processing for the PC, 1991-1995 Materials Data, Inc.*

4.2.3 Caracterização Física

Para a determinação das caracterizações físicas da argila e do chamote foram realizados ensaios de análise granulométrica e limite de plasticidade. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

4.2.3.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulometria da argila e do chamote foi realizada conforme ABNT NBR 7181:1984, a qual combina técnicas de peneiramento e de sedimentação com ou sem defloculante.

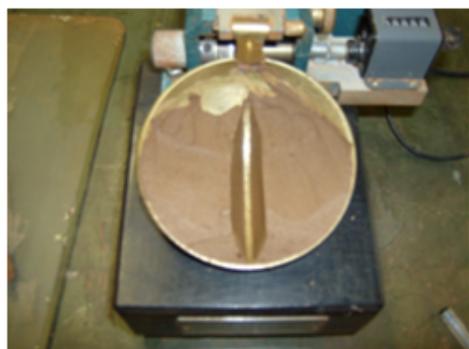
4.2.3.2 Limite de Plasticidade

Souza Santos (1989) destaca que o comportamento plástico de qualquer massa argilosa depende da relação água/argila. Desta forma, algumas argilas apresentam maior capacidade de desenvolver este comportamento que outras, com independência do conteúdo de umidade da massa. Esta capacidade está diretamente ligada às características físico-químicas do material.

A determinação do limite de plasticidade foi obtida segundo o método de Atterberg, calculado pela ABNT NBR 7180:1984.

Este ensaio foi realizado para a argila e para cada composição argila-chamote buscando-se prever a quantidade mínima de água que se deveria adicionar à massa, para que esta obtivesse plasticidade suficiente para ser conformada por extrusão.

Realizou-se também o ensaio de limite de liquidez para a argila, descrito pela ABNT NBR 6459:1984 a fim de determinar o índice de plasticidade que sugere o grau de plasticidade deste material.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Vista da realização dos ensaios para determinação do limite de liquidez (a) e determinação do limite de plasticidade da argila (b)

4.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Primeiramente a argila foi seca em estufa a 110⁰C por 24 horas e em seguida destorroada. Posteriormente separou-se a fração passante na peneira #16 (abertura 1,19 mm). O chamote foi passado em peneira #20 (abertura 0,85mm). A partir da separação do material, foram formuladas as composições para a conformação, secagem e queima dos corpos de prova.

A separação da fração do chamote em peneira #20 foi determinada pelo fato de se buscar um melhor aproveitamento da quantidade do resíduo.

Vale ressaltar que, comumente, as indústrias cerâmicas moldam seus blocos sem peneiramento dos grãos de argila. Desta forma, optou-se pela escolha da peneira #16 para a seleção dos grãos de argila, já que trata-se da primeira peneira da série do peneiramento fino, de abertura considerável, apenas retendo material mais grosseiro.

4.3.1 Formulação

Foram elaboradas, então, quatro composições com mistura de argila e chamote, conforme mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Composições a serem investigadas

Matéria Prima	Composição (%)				
	0CH	5CH	10CH	15CH	20CH
Argila	100	95	90	85	80
Chamote	0	5	10	15	20

A formulação 0CH é a composição padrão que será utilizada, ou seja, sem adição de resíduo. A 5CH será composta de 5% de chamote e 95% de argila e massa. A de 10CH aumenta em dobro essa quantidade em relação à primeira composição com adição e a 20CH já apresenta considerável quantidade de resíduo em massa no corpo cerâmico. Para melhor investigação das propriedades, foi determinada outra formulação, intermediária à 10CH e 20CH, sendo esta a de 15CH, totalizando cinco composições.

4.3.2 Conformação

A conformação foi realizada por extrusão em maromba à vácuo, de marca MVIG-O5, no Laboratório de ensaios de Materiais – LEM da UNB.

Foram produzidos sessenta (60) corpos de prova, quatro (4) para cada composição argila-chamote, nas dimensões 100x30x13,8mm.

A homogeneização das massas se deu de forma manual, adicionando-se quantidades de água, baseadas no cálculo do limite de plasticidade de cada composição.



Figura 4.8 – Imagem da extrusora utilizada para a moldagem dos corpos de prova

4.3.3 Secagem

Os corpos de prova foram levados à secagem natural por 48 horas seguido de secagem em estufa a 105°C-110°C por 24 horas. (para estabelecer a umidade higroscópica). Os corpos de prova foram medidos nesta etapa para a realização do ensaio de retração linear na secagem, conforme descrito no item 4.4.1.



(a)



(b)

Figura 4.9 Figura dos corpos de prova em secagem natural (a) e secagem em estufa (b)

4.3.4 Queima dos corpos de prova

Para a etapa de queima utilizou-se forno elétrico tipo mufla (faixa de trabalho 800 a 1200°C). Os corpos de prova foram submetidos a três temperaturas de queima: 850°C, 950 °C e 1050 °C (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Disposição dos corpos de prova na mufla

Normalmente uma curva de queima envolve uma constante taxa de aquecimento até a temperatura máxima e o tempo de permanência neste estágio, para que todas as reações necessárias se processem a fim de se obter as propriedades desejadas no produto cerâmico. A taxa de aquecimento utilizada foi na ordem de 2,5°C/min, com um patamar de queima de 2 horas. O gráfico na Figura 4.11 indica o ciclo de queima para cada temperatura.

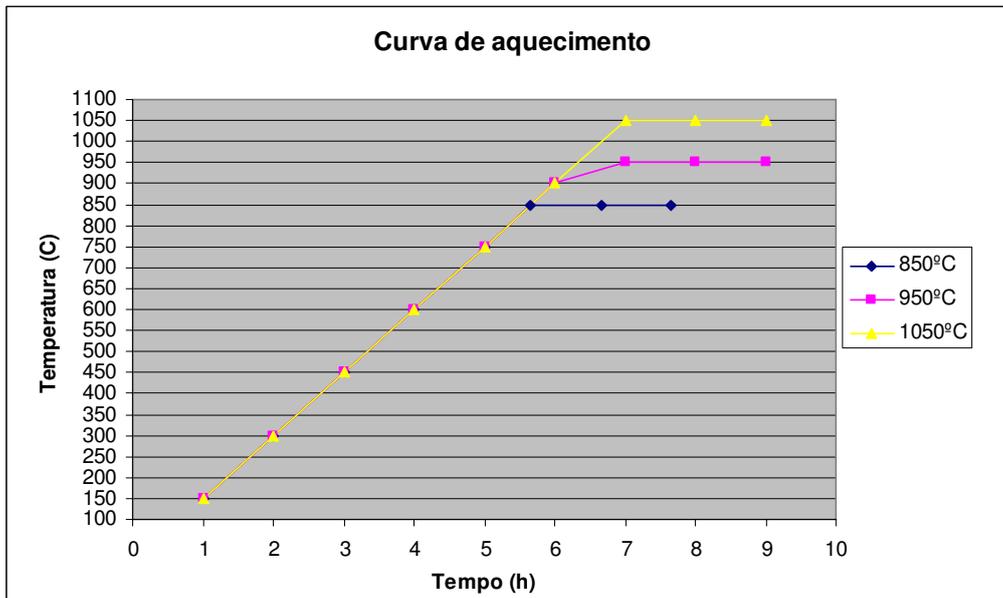


Figura 4.11 – Curva de aquecimento dos copos de prova

4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

Após a etapa de queima foram determinadas as propriedades físicas (retração linear após queima, absorção de água, porosidade aparente e curva de gresificação) e mecânicas (resistência à flexão em três pontos) descritas a seguir.

4.4.1 Retração Linear

O comprimento dos corpos de prova foi medido após a moldagem, a secagem natural e secagem em estufa, para as diferentes temperaturas estabelecidas. A equação 4.1 foi utilizada para determinação da retração linear de secagem e queima.

$$RL = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100(\%) \quad (4.1)$$

onde:

RL = Retração Linear de sinterização

L_0 = Comprimento inicial do CP (mm)

L_1 = Comprimento final do CP (mm)

4.4.2 Absorção de Água (AA) e Porosidade Aparente (PA)

O procedimento para obtenção da absorção de água e porosidade aparente baseou-se na norma ABNT NBR 6458:1984.

Foi determinado o peso seco dos corpos de prova, que posteriormente foram imersos em água por 24 horas. Depois de retirados da imersão, foi eliminado o excesso de água por meio de pano limpo e úmido para então determinar o peso úmido e peso imerso. De posse desses dados calculou-se absorção de água e porosidade aparente por meio das seguintes equações:

A medida de absorção de água é feita através da equação abaixo:

$$AA = \frac{P_U - P_S}{P_S} \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

onde:

AA = Absorção de água

P_U = peso úmido do CP (g)

P_S = peso seco do CP (g)

A medida da porosidade aparente foi determinada através da equação

$$PA = \frac{P_U - P_S}{P_U - P_I} \times 100 (\%) \quad (4.3)$$

onde:

PA = porosidade aparente

P_U = peso úmido do CP (g)

P_S = peso seco do CP (g)

P_I = peso imerso do CP (g)

4.4.3 Massa Específica Aparente (MEA)

O procedimento para obtenção da massa específica aparente baseou-se na norma ABNT NBR 6458:1984.

A medida da massa específica aparente foi calculada com base na ABNT 6458:1984 empregando-se a seguinte equação:

$$MEA = \frac{M_s}{M_U - M_I} (g / cm^3) \quad (4.4)$$

onde:

MEA = massa específica aparente

M^*_s = Massa do CP seco antes da queima (g)

M_s = Massa do CP seco após a queima (g)

M_U = Massa do CP úmido após a queima (g)

M_I = Massa do CP imerso após a queima (g)

4.4.4 Curva de gresificação

As duas principais variações sofridas pelo corpo cerâmico durante a queima são a retração linear e a diminuição da porosidade, sendo esta última traduzida pela absorção de água. A curva de gresificação é a representação gráfica simultânea dessas variações com as temperaturas correspondentes.

Esta curva permite avaliar a tolerância da massa às variações de temperatura e condições de processamento. Além disso tendo-se estabelecido qual a faixa de absorção de água desejada e a variação de tamanho admissível no produto final, pode-se utilizar essa curva para identificar a temperatura na qual essas características são alcançadas (Melchiades et al., 1996)

4.4.5 Resistência Mecânica

A resistência mecânica dos corpos de prova foi avaliada através do ensaio de tensão de ruptura à flexão em três pontos, com base na norma ABNT NBR 13816:1997, com utilização de uma máquina de ensaio universal de laboratório, da marca MTS 810,

programada para operar com taxa de carregamento de 2mm/min. A distancia entre os apoios, conforme recomendação da Norma, foi fixada em 8cm (Figura 4.13). Este ensaio foi realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

Outros autores utilizam para a investigação do módulo de ruptura à flexão de materiais cerâmicos a norma americana, ASTM C133:1997. Nesta pesquisa, optou-se pela norma brasileira devido à incompatibilidade de parâmetros sugeridos por essa norma e os definidos por esse trabalho, como por exemplo, as dimensões dos corpos de prova.



Figura 4.12 – Máquina universal utilizada para o ensaio de resistência mecânica à flexão. Detalhe das barras cilíndricas, central e de apoio, recobertas de borracha.

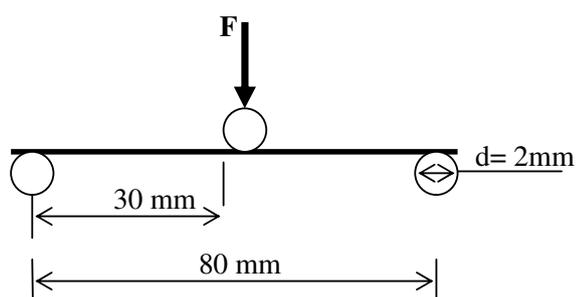


Figura 4.13 – Figura esquemática de montagem do ensaio de ruptura à flexão em três pontos

A equação 4.5 apresenta a fórmula para o cálculo da tensão de ruptura à flexão em três pontos :

$$\sigma = \frac{3FL}{2b \cdot e^2} (MPa) \quad (4.5)$$

onde:

σ = tensão de ruptura à flexão

F = Força de ruptura (N)

L = Distância entre as barras de apoio (mm)

b = largura do corpo de prova (mm)

h = Espessura do corpo de prova (mm)

4.5 PERDA AO FOGO

Foi investigada também, para cada composição a perda ao fogo, que nada mais é a perda de massa do corpo cerâmico quando submetido à queima.

Para tal, pesou-se a massa dos corpos de prova secos a 110°C antes e após a queima (Equação 4.6)

$$\%P.F = \frac{MSE - MQ}{MQ} \cdot 100 \quad (4.6)$$

onde:

$P.F$ = perda ao fogo

MSE = massa seca após a estufa (g)

MQ = massa após a queima (g)

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Composição química

As determinações para os elementos (Si, Al, Fe, Ti, Mn, Ca e Mg) foram feitas por espectrometria de emissão atômica (ICP/EAS), enquanto o sódio (Na) e o potássio (K) foram identificados por espectrometria de absorção atômica (ICP/AES). As análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica (LAGEQ) do Instituto de Geociências, da Universidade de Brasília.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos na análise química das matérias-primas, destacando os elementos maiores, em %.

AMOSTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P.F	Total
Argila	54,3	19,97	9,47	1,45	0,22	1,04	1,47	0,29	0,91	10,44	99,56
Chamote	64,06	17,62	10,83	1,67	0,13	0,77	0,61	0,17	1,23	2,82	99,91

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.1 observa-se que para ambas as amostras analisadas o principal constituinte é a sílica (SiO₂) com percentuais de 54,3% e 64,06% para a argila e o chamote, respectivamente. Quanto ao teor de alumina (Al₂O₃) e a hematita (Fe₂O₃) nas duas amostras, foram encontrados valores próximos. Tor de ferro superior a 5% indica cor vermelha após a queima dos corpos-de-prova.

Quanto aos óxidos alcalinos (K₂O e Na₂O) e alcalinos terrosos (MgO e CaO), foram identificados baixos teores nas amostras. Esses óxidos são importantes porque formam a fase vítrea após a queima.

Em relação à perda ao fogo (PF), percebe-se que o chamote tem um valor percentual mais baixo que a argila, o que pode ser explicado devido ao mesmo ter se submetido anteriormente a um processo de queima.

Pode-se concluir que as matérias-primas em estudo são adequadas para a utilização em cerâmica vermelha.

5.1.2 Composição mineralógica

5.1.2.1- Argila

Os minerais sugeridos para a amostra de argila foram: quartzo, illita, caolinita, pirofilita, hematita, rutilo e microclíneo. (Figura 5.1).

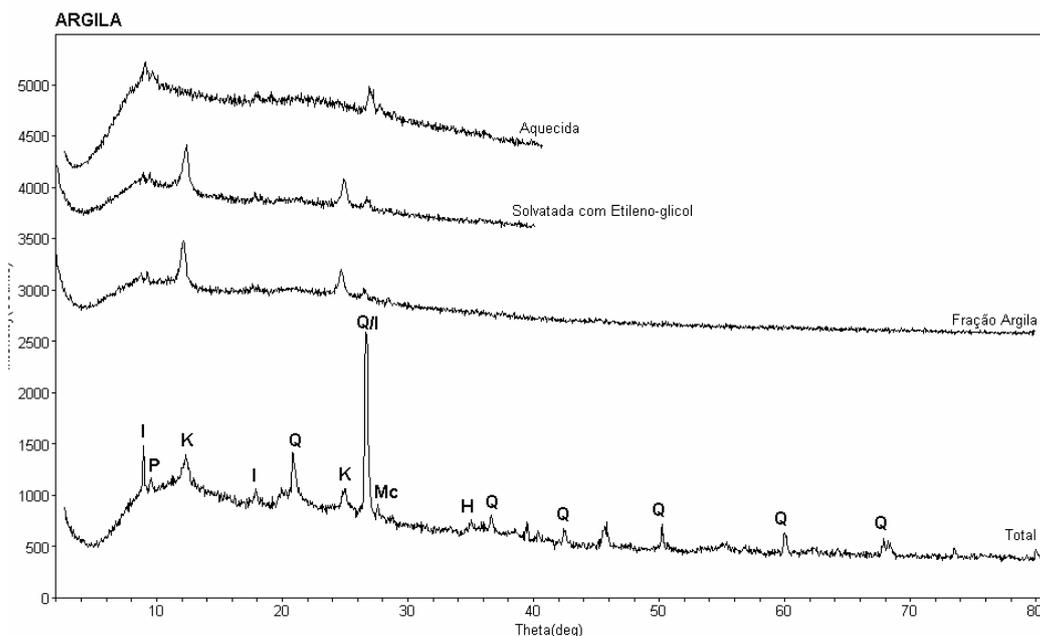


Figura 5.1 – Difratograma da amostra de argila, mostrando as reflexões características dos minerais: Q: quartzo; K: caolinita; I: illita; H: hematita; P: pirofilita; Mc: microclíneo

Na amostra total, observa-se como constituintes maiores o quartzo em $d \sim 4,27 \text{ \AA}$, a illita em $d \sim 10,0 \text{ \AA}$, a caolinita com $d \sim 7,0 \text{ \AA}$. A pirofilita com reflexão em $d \sim 9,34 \text{ \AA}$ é identificada como constituinte menor, enquanto a hematita e o microclíneo com reflexões em $d \sim 2,69 \text{ \AA}$ e $d \sim 3,23 \text{ \AA}$ respectivamente, aparecem como minerais traços.

Na fração argila, o quartzo desaparece havendo uma predominância da caolinita. Em relação à amostra total, há indicação da diminuição da quantidade de illita e a permanência da pirofilita.

Não houve alterações na amostra solvatada com etileno glicol, o que comprova a não existência de minerais expansivos na amostra.

Na amostra aquecida, o pico da caulinita desaparece realçando a reflexão da illita, visto que esta não se altera sob o aquecimento de 490°C (temperatura utilizada nesta etapa do ensaio). Também, observa-se que a pirofilita não sofre modificação com tal condição de temperatura.

A medida que a fração argila está sendo purificada (ou seja, minerais acessórios sendo retirados) a argila deixa de ser representativa.

5.1.2.2 - Chamote

Para a amostra chamote foram identificados os seguintes minerais: quartzo, illita, hematita, rutilo e diásporo. (Figura 5.2)

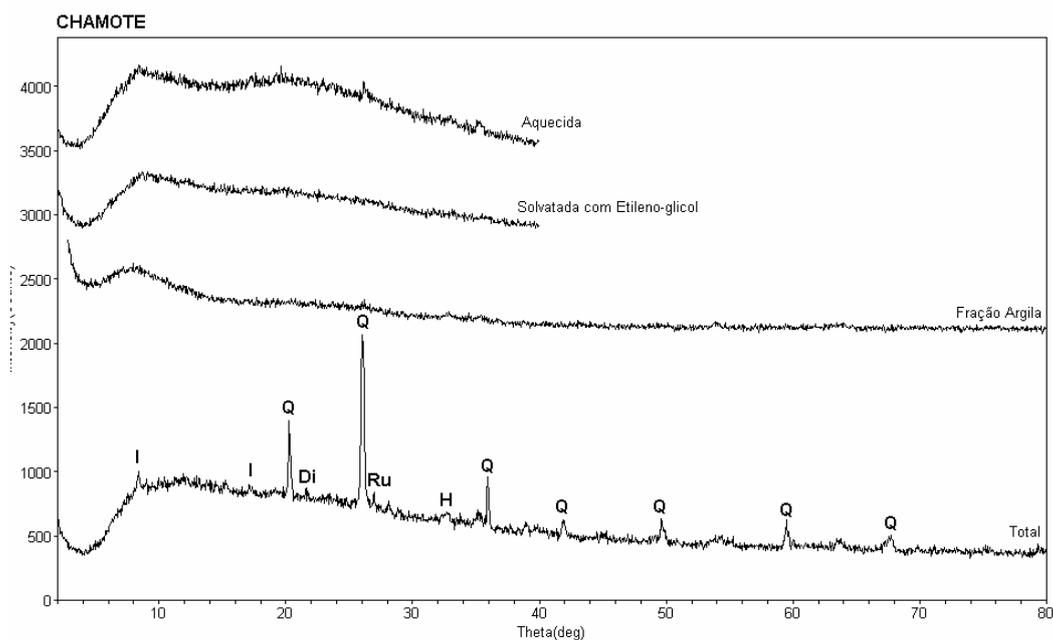


Figura 5.2 – Difratograma da amostra chamote, indicando as reflexões características dos minerais: Q: quartzo; I: illita; H: hematita; Ru: rutilo; Di: diásporo

Na amostra total identificou-se quartzo como constituinte predominante, illita como constituinte menor e hematita, diásporo e rutilo como minerais traços.

Na fração argila e na amostra solvatada com etileno glicol não foram identificados minerais, justificado pela ausência de reflexões no difratograma, apenas uma sutil indicação da presença de quartzo na fração argila e aquecida.

Vale destacar que a caulinita identificada na amostra de argila não se faz mais presente no chamote.

Para melhor investigar as características mineralógicas do chamote, este foi submetido ao aquecimento em três temperaturas: 850°C, 950°C e 1050°C, selecionadas para os ensaios dos corpos de prova estudados neste trabalho. Observa-se que o chamote foi obtido a uma temperatura de 800°C.

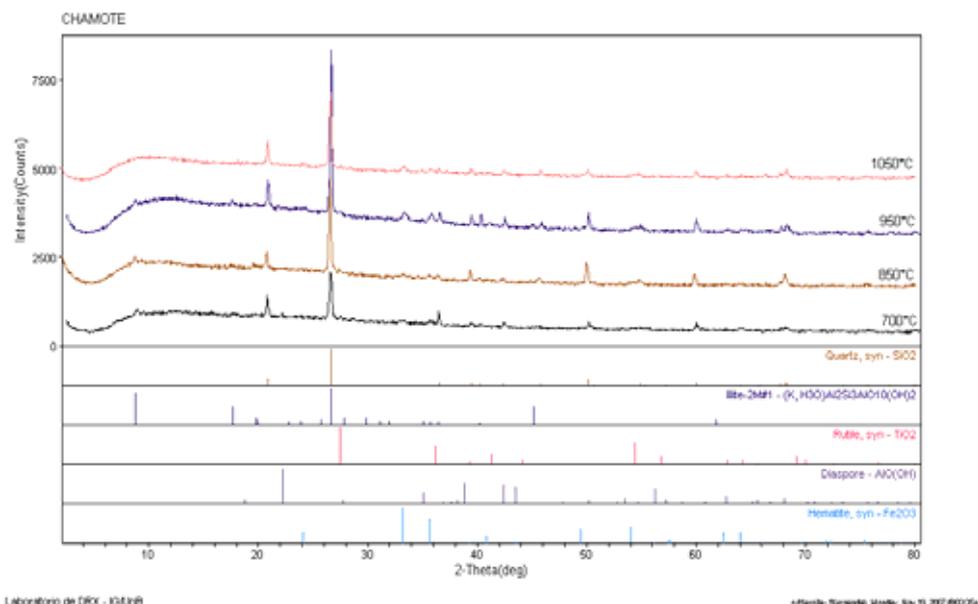


Figura 5.3 – Difratograma do material chamote submetido ao aquecimento de 850°C, 950°C e 1050°C

Ao submeter o chamote (800°C) ao aquecimento de 850°C, 950°C e 1050°C, foram observados, para os diversos minerais constituintes:

Illita: para as temperaturas de 800°C, 850°C e 950°C não ocorreram modificações relativas as suas principais reflexões, entretanto, ao atingir a temperatura de 1050 °C, verificou-se o colapso na estrutura cristalina revelada pelo desaparecimento do pico em 10 Å.

Hematita: na amostra de chamote (800°C) as reflexões características da hematita estão difusas e pouco expressivas, porém, à medida que se eleva a temperatura, percebe-se uma reestruturação cristalina, marcada por uma melhor definição de seus picos, realçados por um aumento na sua intensidade e uma melhor simetria.

Quartzo: não foram observadas modificações, nem rearranjos de fases cristalinas de altas temperaturas, nas condições empregadas na amostra.

Diásporo: desaparece a partir do aquecimento a 850°C

Rutilo: Mantém-se nas temperaturas experimentadas.

Na Tabela 5.2 é apresentado um quadro resumo das fases mineralógicas identificadas para a argila e o chamote no difratograma.

Tabela 5.2 - Quadro resumo das fases identificadas pelo difratograma para a argila e o chamote

MINERAIS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	DISTÂNCIA INTERPLANAR - d (Å)-	AMOSTRAS – Abundância Relativa	
			ARGILA	CHAMOTE
Quartzo	SiO ₂	4,27; 3,34;	Maior	Maior
Ilita	(K,H ⁺)Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	10,27;	Menor	Menor
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	7,05;	Menor	-----
Microclíneo	KAlSi ₃ O ₈	3,24;	Traço	Traço
Hematita	Fe ₂ O ₃	2,69; 2,52;	Traço	Traço
Pirofilita	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	9,45;	Traço	-----
Rutilo	TiO ₂	4,25;	-----	Traço
Diásporo	AlO(OH)		-----	Traço

A definição de cada fase mineral, como constituinte maior, menor ou traço, foi obtida pela comparação das intensidades das suas reflexões características (distância interplanar – d).

5.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Na Figura 5.4 são apresentados os gráficos das distribuições granulométricas para as matérias-primas.

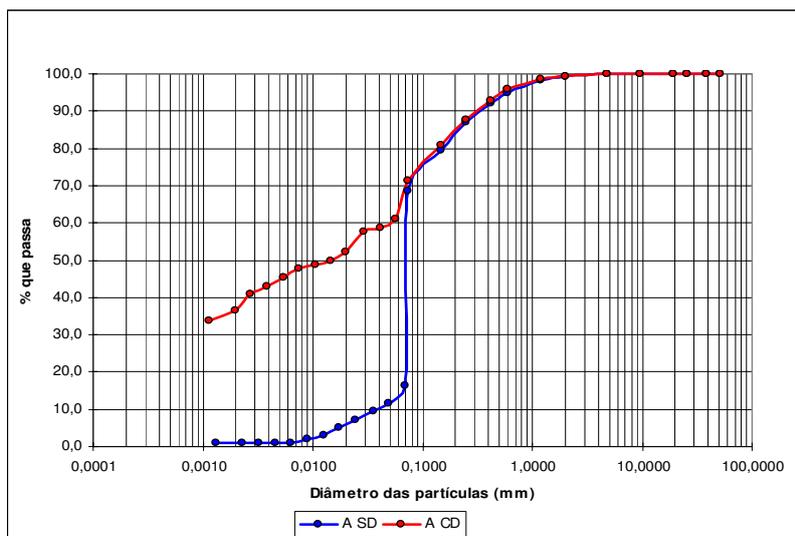


Figura 5.4 – Distribuição granulométrica da argila com e sem a utilização de defloculante

Na argila em estudo, houve o predomínio da granulação silte-arenosa para o ensaio de granulometria sem defloculante. Para o ensaio com defloculante, como ocorreu a dispersão das partículas de silte, acarretando variação da granulometria, tornando-se argilo-arenosa (Tabela 5.3).

Segundo Souza Santos (1989), a massa para a fabricação de blocos cerâmicos deve ter a composição variando de 15 a 45% de argila e 15 a 30% de areia. Esses limites foram observados nos resultados com defloculante.

Tabela 5.3 – Distribuição granulométrica da argila.

	Sem defloculante (%)	Com Defloculante (%)
Pedregulho (0,2<d<6mm)	0,5	0,5
Areia (0,02<d<0,2mm)	85,4	36,7
Silte (0,002<d<0,02mm)	13,2	21,6
Argila (d<0,002mm)	0,9	41,1

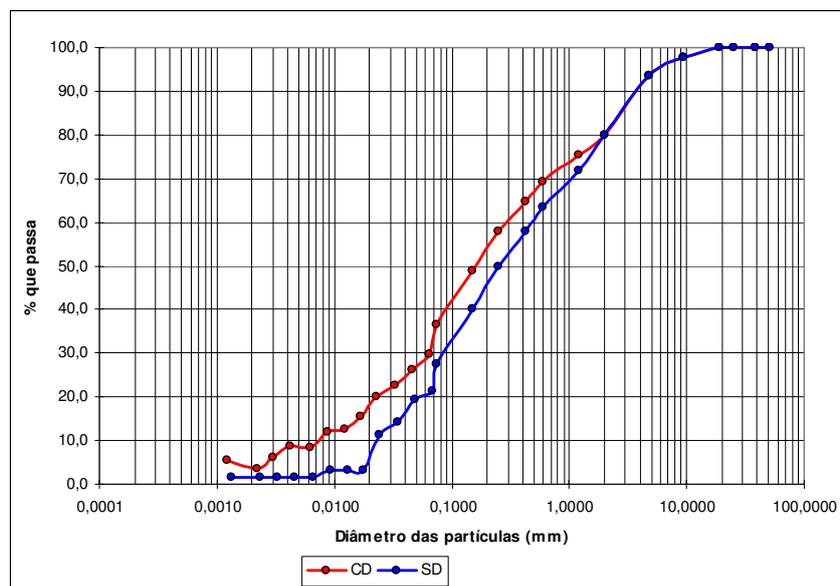


Figura 5.5 – Distribuição granulométrica do chamote com e sem a utilização de defloculante

Para o chamote, no ensaio de granulometria sem a utilização de defloculante, observou-se a predominância da fração de areia, com valor de 59,5%, um baixo percentual de argila, com valor de 1,5% e um considerável percentual de pedregulho fino. Nota-se que a amostra com defloculante não desagregou as partículas, e os resultados das frações quase não variaram em relação aos resultados da análise sem defloculante (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Distribuição granulométrica do chamote

	Sem Defloculante (%)	Com Defloculante (%)
Pedregulho (0,2<d<6mm)	20	20
Areia (0,02<d<0,2mm)	59,50	51,1
Silte (0,002<d<0,02mm)	19,0	27,2
Argila (d<0,002mm)	1,5	1,7

Esses resultados não foram muito satisfatórios devido ao expressivo percentual de pedregulho fino, o que demonstra que a trituração dos descartes de blocos, no moinho

de bolas, não foi otimizada. A provável justificativa para esse inconveniente seria o procedimento adotado para cominuir o material, no que diz respeito ao número de rotações do equipamento e o número de esferas utilizadas para o processo. Para este trabalho foram colocadas 8 esferas de aço com diâmetro igual a 40mm para cada 5Kg de amostra, com rotação de 750rpm, durante 15 minutos.

Por outro lado, é desejável um máximo de aproveitamento do resíduo para a formulação de massas cerâmicas. Para o alcance do mesmo, na etapa de peneiramento, a peneira utilizada foi a #20 (abertura 0,85mm) e não as de malha mais fina.

5.3 LIMITE DE PLASTICIDADE

Os limites de consistência encontrados para a argila e o limite de plasticidade para cada composição da massa cerâmica (5, 10, 15 e 20 % de chamote) são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores do índice de plasticidade da argila e dos limites de plasticidade das composições.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Argila	49	28	21
Chamote	-	NP	-
5CH	-	29	-
10CH	-	26	-
15CH	-	27	-
20CH	-	28	-

NP – não plástico

Os resultados obtidos para o índice de plasticidade, permitem classificar a argila, conforme Caputo (1988) como altamente plástica.

Segundo Souza Santos (1989) o valor para o limite de plasticidade deve estar entre 15 e 25% , e para o índice de plasticidade, a variação é de 10 a 35% para a utilização da argila na fabricação de blocos cerâmicos.

De acordo com a tabela 5.5, para os limites de plasticidade, o valor que se aproximou mais dos intervalos sugeridos pelo autor foi o da adição de 10% de chamote. Apesar da

plasticidade da argila não satisfazer os limites estabelecidos por Souza Santos (1989), o seu índice de plasticidade se encontra dentro do intervalo de 10 a 35%.

A partir do ensaio de limite de plasticidade constatou-se que o chamote não apresentou plasticidade, considerado assim, como um material não plástico (NP). Dois aspectos que podem justificar isto é a granulometria pouco fina adquirida quando passado na peneira # 20 (abertura 0,85mm) comportando-se como um solo arenoso e o fato desse material já ter sofrido aquecimento, o que acarreta a vaporização da água quimicamente combinada nas superfícies das partículas e de dentro das fases cristalinas que contêm água de cristalização, e a decomposição de carbonatos, sulfatos, e outros sais.

A partir dos dados da Tabela 5.5, observa-se que as adições de 5, 15 e 20% de chamote apresentaram pequena variação para o limite de plasticidade em relação à composição só de argila. A adição de 10% reduziu o valor do limite de plasticidade. Isso implica que esta formulação necessita de menos água para sua conformação.

Um maior valor de limite de plasticidade indica a necessidade de uma maior quantidade de água para a extrusão, conseqüentemente a etapa de secagem pode ser mais problemática com aumento do risco de defeitos e tempo mais prolongado que aumenta o gasto energético e reduz a produtividade (Vieira *et al*, 2003)

Desta forma, a incorporação do chamote, na proporção de 10%, interfere positivamente nessa propriedade.

5.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

5.4.1 Curva de gresificação

A Figura 5.6 apresenta a curva de gresificação para os corpos de prova produzidos a partir da incorporação de 5%,10%,15% e 20% de chamote e produzidos apenas com argila.

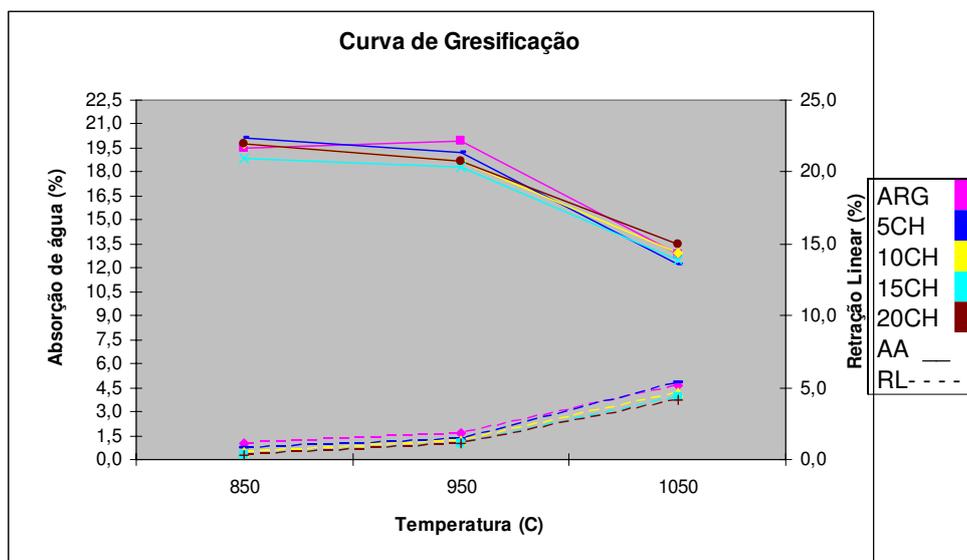


Figura 5.6 Curva de gresificação para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote

A partir da Figura 5.6 (que relaciona a absorção de água (AA) e retração linear (RL) em função da temperatura) pôde-se constatar que com a incorporação de chamote houve um aumento da absorção de água e conseqüentemente da porosidade aparente.

Os valores tabelados por Souza Santos (1989) para utilização da argila na indústria de cerâmica vermelha devem estar entre 0% e 25% para a absorção de água, conforme Tabela B1 e gráfico B3, encontrados no apêndice B. A composição 20CH apresentou os maiores valores, com máximo de 22% para a temperatura de 850°C. O menor registro foi para a composição 5CH de 12,24%, na temperatura de 1050°C. Assim, todas as composições analisadas atenderam ao valor limite sugerido.

A porosidade aparente obteve maiores percentuais na composição 20CH, com máximo de 36,4%. Os corpos cerâmicos sem adição indicaram menores percentuais, com mínimo de 21,62% para 1050°C. Os valores das composições intermediárias às de ARG e 20CH variaram entre os percentuais mínimos e máximos citados.

O aumento na absorção de água e conseqüentemente, da porosidade aparente deve-se, possivelmente, ao fato dos dois materiais obterem tamanhos aproximados, contribuindo para um empacotamento descontínuo, com a presença de “vazios”, pela incorporação do resíduo queimado.

Experimentalmente comprova-se que a partir de modificações na distribuição de tamanhos de partículas de uma determinada matéria-prima é possível obter-se diferentes compactabilidades nas peças conformadas. Um exemplo deste comportamento se observa em argilas de cor de queima vermelha, onde à medida que aumenta o resíduo acima de 63 µm se obtém valores mais elevados de densidade aparente. Normalmente, aborda-se o estudo do empacotamento das partículas supondo-se que as mesmas são esferas indeformáveis (Matsumoto, 1991). O valor de compactabilidade pode ser aumentado mediante a adição de esferas de distintos tamanhos. A Figura 5.7 mostra esquematicamente como, mediante a mistura de esferas de diferentes tamanhos (Figura 5.7b e 5.7c), é possível aumentar a compactabilidade da mesma em relação à quantidade proporcional de esferas de um único tamanho (Figura 5.7a). Da mesma forma, comprova-se a importância de selecionar adequadamente o diâmetro das esferas de menor tamanho, para que estas possam ocupar os buracos existentes entre as esferas maiores. Caso contrário, se o diâmetro das esferas adicionadas à mistura for muito grande (Figura 5.7d) ainda existe um aumento da compactabilidade. Porém, esta não é efetiva devido às modificações na ordenação original nas esferas de tamanhos maiores. Assim, um dos parâmetros mais importantes para se obter misturas que gerem uma alta compactabilidade é a relação de tamanhos entre as diferentes esferas (Barba, 1997 e Matsumoto, 1991).

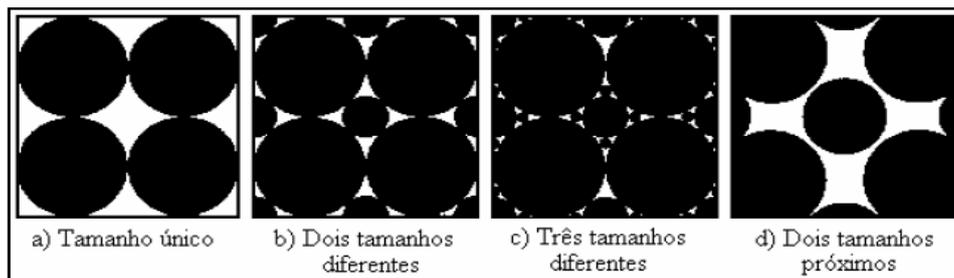
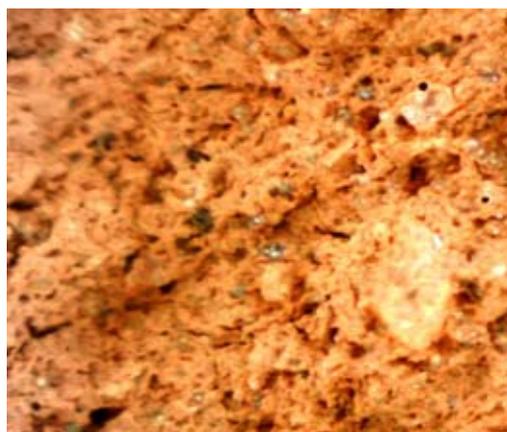


Figura 5.7 Representação esquemática do empacotamento de esferas de diferentes tamanhos (Barba, 1997)

Imagens capturadas por microscópio eletrônico evidenciam um considerável aumento da porosidade aparente e absorção de água com o incremento do resíduo. Isso ocorreu para as três temperaturas, sendo que o valor mais representativo foi percebido na temperatura de 1050°C, na qual as massas com 20% de adição tiveram maiores valores para ambas propriedades quando comparadas com as massas compostas só por argila.

Constatou-se neste trabalho, pontos de descontinuidades e vazios mais visíveis na massa cerâmica com adição, para as massa cerâmicas com teores de 15 e 20%, isto foi mais evidente (Figura 5.8). Além da granulometria do chamote pouco fina ter contribuído para o aumento da porosidade e absorção de água, pode-se mencionar a falta de homogeneidade das composições, por ter sido efetuada manualmente. Talvez, com o auxílio de um misturador mecânico, os pontos de descontinuidade seriam reduzidos.



(a)

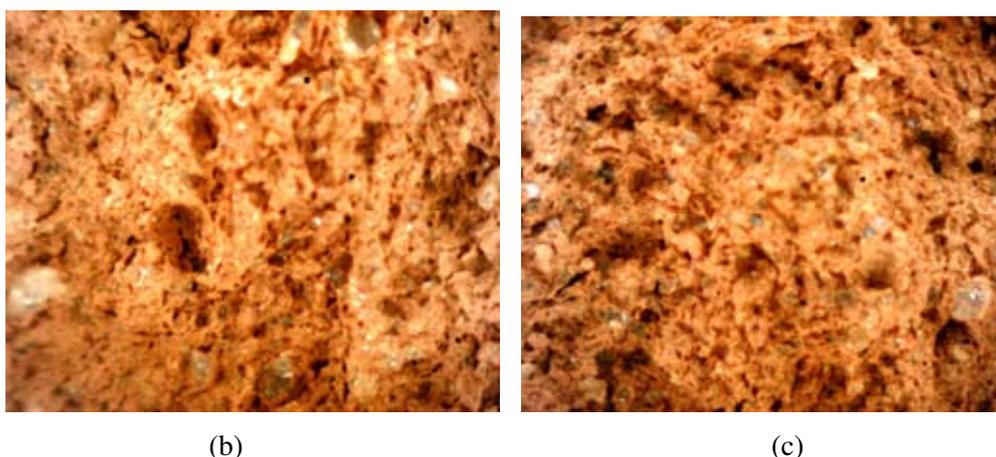


Figura 5.8 Vista da microestrutura dos corpos cerâmicos obtidas por microscópio eletrônico com 100x de aumento. (a) composição de argila (b) adição de 15% de chamote (c) adição de 20% de chamote

Os valores de retração linear de secagem variaram de 0,30 a 4,84%, o que satisfaz o valor máximo desejado e recomendado por Macedo (2005), que é de 6%). Os resultados encontrados para cada composição nas respectivas temperaturas de queima podem ser conferidos na Tabela 5.7

Tabela 5.7 Resultados da retração de secagem, temperatura 110°C.

Composição(%)	Retração na secagem (%)		
	100°C	110°C	120°C
ARG	1,03	1,68	4,66
5CH	0,75	1,29	4,84
10CH	0,49	1,32	4,70
15CH	0,31	1,14	4,32
20CH	0,30	1,14	4,13

.De acordo com Pracidelli (1997), a adição de não-plásticos às argilas reduz a sua interação com a água, causando pontos de descontinuidade nas forças de coesão entre as partículas. Os pontos de descontinuidade produzem poros, que permitem a passagem da água do interior até a superfície da peça, tornando fácil a secagem das massas. Desta forma, no secador, há redução do ciclo de secagem devido à facilidade de saída da água, com menores gradientes de umidade. Os desplastificantes são geralmente constituídos de grãos que permanecem inertes na fase de secagem e reagem na queima formando novos componentes.

Vale ressaltar que a água de conformação utilizada foi bem próxima para cada composição, tornando-se um parâmetro constante e que não influenciaria nessa discussão.

Em relação à retração linear de queima, observou-se a incorporação do chamote implicou no seu decréscimo, o que aconteceu para todas as temperaturas experimentadas.

Os resultados de retração na queima para a temperatura de 850°C apontaram valor mínimo de 0,3% (adição de 20% de chamote) e valor máximo de 1,03% (sem adição de chamote) . Para as temperaturas de 950°C e 1050°C, novamente foram encontrados para as formulações com adição valores mínimos e valores máximos para a formulação de argila.

Pela curva de gresificação, pode-se perceber que para todos os corpos de prova ensaiados ocorre um acréscimo da retração, com o aumento da temperatura de queima, para todas as formulações. Isto ocorre devido ao maior grau de sinterização, provocando mudanças físicas e redução do volume dos corpos de prova pela perda de água (fase líquida) Comparando as queimas de 850°C e 1050°C, a retração obteve acréscimo, variando entre 7,26% a 22%. (Tabela 5.8)

Tabela 5.8 Resultados da retração de queima em função da temperatura.

Retração de queima (%)			
Composição(%)	850(°C)	950(°C)	1050(°C)
ARG	3,28	3,26	3,31
5CH	3,24	3,20	3,20
10CH	2,88	2,91	2,89
15CH	2,84	2,86	2,86
20CH	2,51	2,52	3,44

Para a retração de secagem, os resultados indicaram que a adição de chamote favoreceu essa propriedade pois, para crescentes teores de resíduo, menores valores foram encontrados.

5.4.2 Resistência à flexão

Para os corpos cerâmicos somente de argila e com adição de 5% os valores da resistência pouco se alteraram, dentre as diferentes temperaturas de queima. Com a incorporação de 10% os valores da resistência aumentaram, porém, para as composições de 15 e 20% a resistência diminuiu em relação a todas as outras misturas (Figura 5.9).

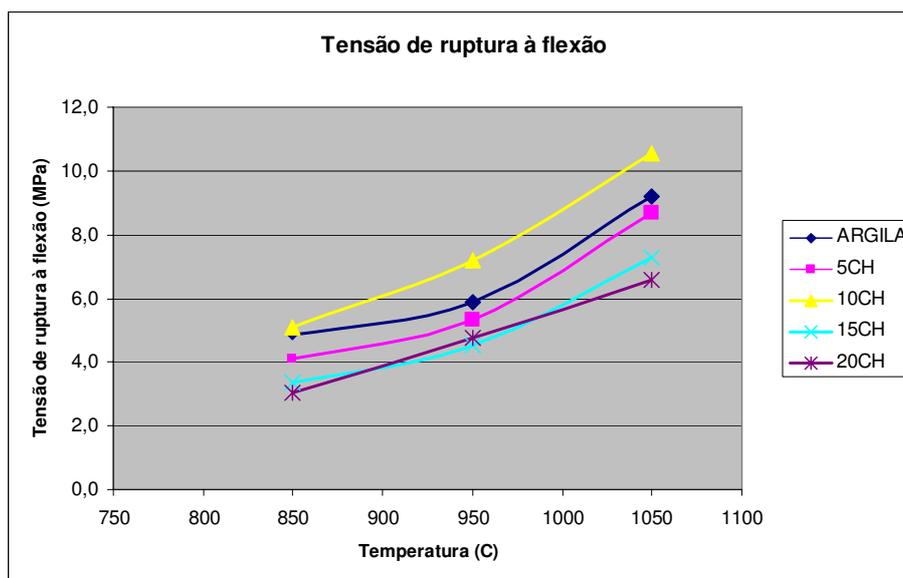


Figura 5.9 – Gráfico das tensões de ruptura para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote, submetidos à queima

O valor estipulado por Souza Santos (1989) para a resistência após a queima é de 5,5 MPa para a utilização da massa na produção de blocos cerâmicos. Nas temperaturas de 850°C e 950°C somente a composição de 10% obteve resultado satisfatório, com valores de 5,1 e 7,2 MPa, respectivamente. A 1050 °C todos os corpos de prova apresentaram valores superiores a 5,5 MPa.

Os valores da resistência à flexão aumentaram à medida que a temperatura de sinterização se elevou. Esses valores chegam a dobrar quando comparadas à queima de 850°C e de 1050°C, Este comportamento pode estar relacionado com a maior sinterização da matéria devido o aumento da temperatura, o que causa uma maior densificação e coesão das partículas, e as propriedades mecânicas apresentam uma melhora significativa. Logo, quanto mais lento for o ciclo de queima e maior a temperatura utilizada, maior será a formação da fase líquida, resultando em um melhor

produto acabado. Porém, cabe salientar que tais medidas tornam a produção mais lenta e onerosa.

No geral, os corpos de prova compostos por argila e com adição de 5% de chamote apresentaram valores bem próximos, ou seja, quase não houve alteração na resistência, para todas as temperaturas experimentadas.

Por outro lado, ocorreu uma redução na resistência à flexão com a adição de chamote para os teores 15 e 20%. Os melhores resultados foram obtidos para a adição de 10% de chamote na massa cerâmica.

Um fator que pode ter influenciado significativamente nestes resultados é a plasticidade das massas cerâmicas em função da presença de chamote e a quantidade de água absorvida nos corpos-de-prova. É bem conhecido que o chamote reduz a plasticidade, sendo seu efeito refletido na menor compactação durante a conformação do corpo-de-prova. Em decorrência disto, a resistência mecânica após a secagem e queima tende a diminuir significativamente. E quanto maior a quantidade de água absorvida, menores resistências mecânicas serão alcançadas.

Verifica-se também que, através da análise química do chamote, quando este é submetido à seguidas elevações de temperatura há uma reestruturação cristalina do elemento hematita, marcada por uma melhor definição de seus picos, realçados por um aumento na sua intensidade e uma melhor simetria. Esta reestruturação corrobora com a resistência mecânica das peças, e para este caso, tem-se a adição de 10% de chamote com melhores resultados.

5.4.3 Massa específica aparente

Os resultados obtidos para a massa específica aparente apresentaram um comportamento inverso aos da porosidade aparente e absorção de água. A adição de 20% de chamote apresentou os menores valores, para todas as temperaturas de queima.

A massa específica aparente se elevou na medida em que ocorreu o aumento a temperatura. Porém, a variação dos valores entre as composições, nas suas respectivas temperaturas, não foi tão expressiva (Figura 5.10)

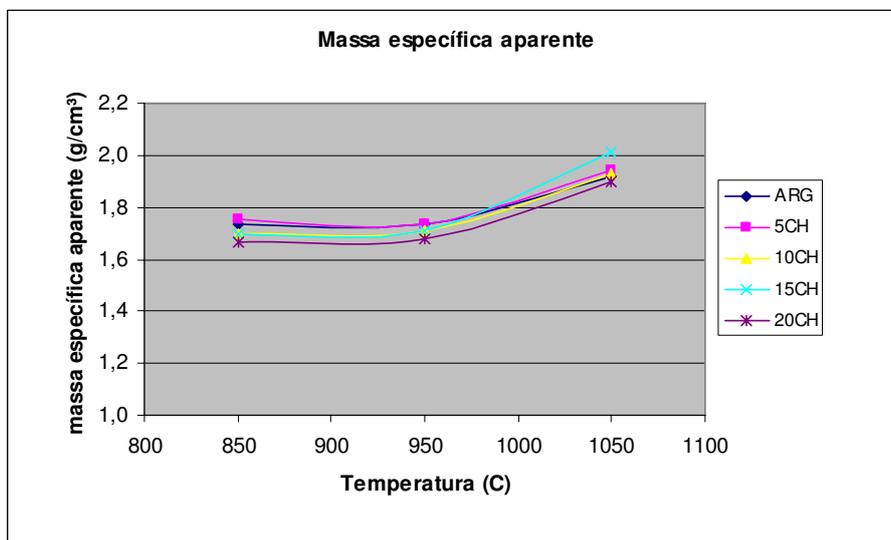


Figura 5.10 Massa específica aparente para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote, submetidos à queima

Para Souza Santos (1989), os valores de massa específica aparente das argilas devem estar entre 1,7 e 2,1 g/cm³ para sua utilização em cerâmica vermelha. Logo, quase todas as composições, nas três temperaturas obtiveram valores neste intervalo, com exceção da composição 20CH que apresentou, nas temperaturas de 850°C e 950°C, valores abaixo do mínimo recomendado.

5.5 PERDA A FOGO

Na Figura 5.11 é apresentado os resultados obtidos para a perda ao fogo para todos os corpos de prova queimados em diferentes temperaturas.

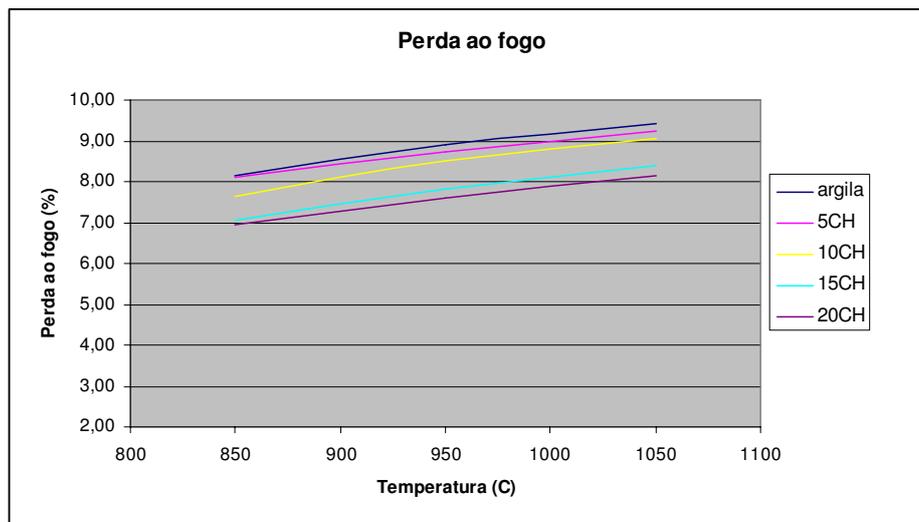


Figura 5.11 - Perda ao fogo dos corpos cerâmicos com e sem chamote, em função da temperatura de queima

É observado que a composição somente de argila, supera os valores das composições com adição. Logo, todas as composições com adição tiveram menor valor em relação à de argila. A mistura 20CH apresentou, nas três temperaturas, os menores percentuais de perda ao fogo. Isso pode ser explicado devido o chamote já ter passado por uma etapa de queima, já nos corpos cerâmicos ARG, os valores são mais expressivos pela decomposição de materiais argilosos, assim como a combustão de matéria orgânica.

O valor da perda ao fogo foi crescente à medida que a temperatura de queima aumentou. E a incorporação de chamote minimizou os efeitos da perda de massa nos corpos de prova.

5.6 COR DE QUEIMA

Na Tabela 5.7 são apresentadas as cores de queima dos corpos cerâmicos formulados com argila e resíduo, nas diversas temperaturas experimentadas.

A cor de queima variou basicamente em tons marrom escuro, marrom claro e tom avermelhado.

Nota-se que para cada composição, nas temperaturas de 850⁰C e 950⁰C quase não houve variação, enquanto que na temperatura de 1050⁰C todos os corpos cerâmicos obtiveram coloração mais escura. A presença de cátions de metais de ferro, titânio, manganês, cromo, entre outros, vão determinar a cor final de queima.

A adição com 10% de chamote resultou numa tonalidade mais avermelhada que as outras, devido à transformação de compostos de ferro presentes na matéria-prima quando submetidas à atmosfera oxidante. Diferente do anterior, os corpos cerâmicos compostos só de argila e com 5% de chamote manifestaram tons marrons, quase não diferindo entre si. A adição de 10% de chamote já indica reações químicas, traduzidas pela cor de queima.

Pela tendência, a composição 20CH, deveria obter uma tonalidade mais próxima à composição de 15CH, e esta por sua vez, tonalidade semelhante aos dos corpos cerâmicos de 10CH. Esse fato não ocorreu, talvez, pela não homogeneidade das massas nessas proporções, na etapa de mistura. Na figura 5.9 são apresentadas as cores obtidas após a queima a 850⁰C, 950⁰C e 1050⁰C.

Tabela 5.9 Cor de queima dos corpos cerâmicos investigados para as três temperaturas de queima.

	850 ⁰ C	950 ⁰ C	1050 ⁰ C
ARG			
5CH			
10CH			
15CH			
20CH			

6. CONCLUSÕES

A análise e a interpretação dos resultados dos ensaios, das diferentes misturas estudadas neste trabalho, possibilitam destacar as seguintes conclusões:

Caracterização química, física e mineralógica

- Através da análise dos difratogramas, a caulinita presente na amostra de argila desapareceu na amostra chamote, ou seja, a caulinita perdeu sua estrutura ao ser submetida à queima (800°C).
- Os resultados da análise química informaram que as matérias-primas em estudo são adequadas para a utilização em cerâmica vermelha.
- A característica de alta plasticidade da argila utilizada, pôde ser atenuada pela incorporação de chamote a 10%. Os limites de plasticidade das outras composições tiveram valor próximo ao da argila.
- Possivelmente, a adição de chamote, com uma granulometria extremamente fina poderia contribuir com o grau de empacotamento da composição.

Retração Linear

- A incorporação de chamote promove uma melhoria nos parâmetros de pré-secagem, diminuindo a retração de queima. Esta constatação é importante, pois possibilita a diminuição de ocorrência de trincas por retração em blocos cerâmicos.

Resistência Mecânica

- A resistência mecânica dos corpos de prova obtidos aumentou em função da temperatura de queima. Porém, todas as composições com adição apresentaram valores inferiores ao da massa padrão, para todas as temperaturas. Com exceção da adição de 10% , que superou os valores da resistência da massa padrão e o valor sugerido por Souza Santos (1989).

- A temperatura de 1050°C traduziu maiores valores de resistência mecânica e massa específica aparente e menores valores de absorção de água, porosidade aparente. Entretanto, apresentou altos valores de retração na queima.

Absorção de água e Porosidade Aparente

- A absorção de água e porosidade aparente dos corpos cerâmicos aumentaram gradativamente com a adição dos teores, entretanto, não superando os intervalos determinados por Souza Santos (1989).

Massa específica aparente

- Os valores da massa específica aparente das composições com chamote não apresentaram grande variação, em relação à massa padrão, estando dentro dos limites sugeridos.

Perda ao Fogo

- A capacidade de perda ao fogo apresentou percentuais menores para os corpos cerâmicos com chamote em relação à massa padrão. Esta menor perda de massa deve-se à presença do chamote, obtido da queima de blocos.

Teor de chamote

- Dentre as composições estudadas, a adição de chamote, na proporção de 10%, foi a mais satisfatória, já que esta atendeu a todos os parâmetros físico-químicos e propriedades tecnológicas determinados neste trabalho.

7. SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, sugere-se, acerca da utilização de chamote para produção de blocos cerâmicos, os seguintes trabalhos futuros:

- Estudo da viabilidade sócio econômica da incorporação de chamote em massas cerâmicas.
- Investigação das propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos a partir da adição dos mesmos teores sugeridos nesta pesquisa, utilizando diversas granulometrias para o chamote.
- Estudo do comportamento de formulações de chamote incorporado a outras argilas, visando potencializar o uso do mesmo em outras regiões.
- Avaliação do efeito da granulometria sobre a porosidade de massas cerâmicas, buscando um modelo para o melhor empacotamento das partículas.
- Estudo do efeito da taxa de aquecimento utilizada na queima, visando diminuir o ciclo de queima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13816**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e método de ensaios, Rio de Janeiro, 1997. 78 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e Requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: Componentes cerâmicos - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2005. 27 p.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIAIS. **ASTM C – 373/97**: Standard Test methods for cold crushing strength and Modulus of rupture of refractories.

ALVES, W. A.; BALDO, J. B. O potencial de utilização de um resíduo argiloso na fabricação de revestimento cerâmico. Parte I – Caracterização. **Revista Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 2, n. 5/6, p. 38-40, set./dez. 1997.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS CERÂMICAS - ANICER. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br>>. Acesso em: 21maio.2007.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 705 p.

BELTRAN, V.; FERRANDO, E.; GARCÍA, J.; SÁNCHEZ, E. *Extruded Rustic Floor Tile I. Impact of the Composition on the Body's Behaviour in the Prefiring Process Stages*, *Tile & Brick Int.* v. 11, n. 3, p. 169-176, 1995.

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**, v.11, n.1,p.44-46, jan/fev.2006.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. v.1.498p.

CARDOSO, A.P. **Tecnologia da cerâmica vermelha do norte do Paraná aplicada na produção de componente para alvenaria estrutural**. 1995.140f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

COSTA, J. S. et al. **Agregados alternativos para argamassas obtidos de vários resíduos industriais**. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, 47., 2003, João Pessoa. **Anais...** 1-8 p .São Paulo: ABC, 2003.

DONDE, M. ; FABBRI, B. ; MARSIGLI, M. “**Resenha das experiências de reciclagem de resíduos industriais e urbanos na produção de tijolos**”. *Cerâmica Informação*, n. 1, p.17-29, nov./dez. 1998.

GOMES, C. F. **Argilas o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988. 457 p.

IOSHIMOTO, E.; THOMAZ, E. **Materiais cerâmicos para construção civil**. São Paulo: USP, 1990. 102 p.

KAZMIERCZAK, C. S. . **Produtos de Cerâmica Vermelha**. In: **Geraldo Chechella Isaia. (Org.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007, v. 1, p. 563-586.

KINGERY, W.D. **Introduction to ceramics**. 1.ed. New York: John Wiley & Sons, 1960.781p.

MACEDO, R. S. **Estudo das matérias-primas e tijolos cerâmicos furados produzidos no Estado da Paraíba**. 1997. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1997.

MACEDO, R. S. **Estudo comparativo entre massas cerâmicas industriais e aditivadas para uso em blocos cerâmicos.** Campina Grande, 2005. 125p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

MEDEIROS, E. N. M.; SPOSTO, R. M. **Caracterização das indústrias de cerâmica vermelha do Estado de Goiás e Distrito Federal para a implantação de um sistema integrado de gestão da qualidade e ambiental.** In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO*, 4, Porto Alegre, 2005.

MELCHIADES F.G., QUINTEIRO E., BOSCHI A, “A Curva de Gresificação: Parte I”, **Cerâmica Industrial**, Agosto/Dezembro, 1996

MORAIS, D. M. ; SPOSTO, R. M. **Propriedades Tecnológicas e Mineralógicas das argilas e suas influências na qualidade de blocos cerâmicos de vedação que abastecem o mercado do Distrito Federal.** *Cerâmica Industrial*, v. 11, p. 35-38, 2006.

MORAIS, D. M, **Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria que Abastece o Distrito Federal.**2007.230f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

NORTON, F. H. **Introdução à tecnologia cerâmica.** Tradução de Jefferson Vieira de Souza. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 324 p.

OLIVEIRA, K. R. B. **Avaliação dos blocos cerâmicos produzidos para a região metropolitana de Goiana - GO.** 2002. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.

PETRUCCI, E.G. R. **Materiais de Construção.** 4 .ed. Porto Alegre: Globo, 1989.435p.

PIANCA, B. J. **Manual do construtor.** 9. ed. Porto Alegre: Globo. 1977. v 1. 169 p.

PINTO, L. F. S. **Potencial de acidificação e de neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em áreas de mineração de carvão.** 1997. 186f. Tese (Doutorado Faculdade de Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F.G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v.2, n.1/2, p. 31-35, jan/fev.1997.

PRACIDELLI, S. **Cerâmica vermelha.** São Paulo: Escola SENAI Armando de Arruda Pereira. 1989. 300 p.

RIBEIRO, M. J. et. al. Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas. **Cerâmica Industrial**, n. 8, p. 37-42, jan./fev. 2003.

RIPOLI FILHO, F. A Utilização do Rejeito Industrial Cerâmico - Chamote - como Fator de Qualidade na Fabricação de Elementos Cerâmicos: um Estudo Experimental. **Cerâmica**, v.43, n.281-282, p.133-139, ago. 1997 .

ROCHA, E. G. A. **Os Resíduos Sólidos de Construção e Demolição:Gerenciamento, quantificação e caracterização. Um estudo de caso no Distrito Federal.**2006.155f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha.** 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SEYE, O. et al. **Melhoramento do processo produtivo de cerâmica estrutural como ação mitigadora para estabilização ou redução adicional nas emissões de gases de efeito estufa.** Projeto BRA/00/014, Fundo Nacional do Meio Ambiente, Programa de Geração de Conhecimento em Mudanças Climáticas e Desertificação, Programa Brasil-Holanda. NEFEN/UFAM. Relatório Final. 200 f. Manaus, 2003.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de argilas.** 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 408p.

SOUZA, M.F.G. **Características de materiais cerâmicos: Anápolis e região.** 1997.65f.Monografia (Trabalho de Conclusão do curso de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Anápolis, Anápolis, 1997.

SPOSTO, R. M. **Análise preliminar da sustentabilidade na produção de blocos cerâmicos para alvenaria em Brasília – DF.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, São Paulo, 2004.

SPOSTO, R. M; MEDEIROS, E. N. M.; RAMOS, D. T. **Levantamento de resíduos industriais e agrícolas e potencial do uso de pó de serra para sinterização de blocos cerâmicos no Distrito Federal e no estado de Goiás.** Revista Cerâmica Industrial. São Paulo, v. 10, n. 3, p. 37-40, maio/junho. 2005.

SPOSTO, R. M; MORAIS, D. M; PEREIRA, C. H. A. F. **Melhoria da qualidade de Blocos Cerâmicos e Implantação de Sistemas de Gestão da Qualidade em Empresas que Abastecem o Mercado de Brasília.** Universidade de Brasília, Brasília, FUB/CDT, SINDUSCON-DF,ago.2006.

TOMAZETTI, R. R. **Análise da produção de cerâmica vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. 2003. 190 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

UNIKOSWSKI, Z.R. **Influence des arciles sur les propriétés des mortiers de ciment**. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, 1982.82p (Rapport de Recherche LPC n°110).

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciências e tecnologia dos materiais**. Tradução de Edson Monteiro. Rio de Janeiro: Elsevier, 1984. 566p.

VICENZI, J. **Efeito da adição de chamota em uma massa cerâmica de argila vermelha**. 1999. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 1999.

VIEIRA, C.M.F.; SOUZA, E.T.A.; MONTEIRO, S.N. Efeito da Incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v.50,n.315, p.254 – 260, set.2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DAS MATÉRIAS PRIMAS

Tabela A1 – Resultado da análise granulométrica da argila e do chamote, com e sem a utilização de defloculante

	ARGILA		CHAMOTE	
	SD (%)	CD (%)	SD (%)	CD (%)
20,0<Pedregulho grosso<60,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,0<Pedregulho médio<20,0	0,0	0,0	5,4	5,4
2,0<Pedregulho fino<6,0	0,5	0,5	14,6	14,6
0,6<Areia grossa<2,0	4,4	3,6	16,4	10,5
0,2<Areia média<0,6	11,9	11,5	18,5	16
0,06< Areia fina <0,2	69,1	21,6	24,6	24,6
0,002 < Silte < 0,06	13,2	21,6	19	27,2
Argila < 0,002	0,9	41,1	1,5	1,7

Tabela A2 – Resultado da média dos valores para absorção de água, expresso em %

	850 °C	950 °C	1050 °C
ARG	19,46	19,96	12,84
5CH	20,10	19,24	12,24
10CH	19,74	18,69	12,90
15CH	20,93	20,31	13,92
20CH	22,00	20,71	15,02

Tabela A3 – Resultado da média dos valores para porosidade aparente, expresso em %

	850 °C	950 °C	1050 °C
ARG	33,56	34,51	24,62
5CH	34,45	33,53	23,69
10CH	33,71	32,63	24,64
15CH	35,30	34,75	26,23
20CH	36,45	35,09	27,79

Tabela A4 – Resultado da média dos valores para massa específica aparente, expresso g/cm^3

	50 °C	950 °C	1050 °C
ARG	1,73	1,74	1,92
5CH	1,75	1,73	1,94
10CH	1,70	1,71	1,93
15CH	1,70	1,71	2,01
20CH	1,67	1,68	1,90

Tabela A5 – Dados e resultados das retrações de secagem natural, secagem após estufa e secagem de queima. Resultados da perda ao fogo dos corpos de prova, nas temperaturas de queima 850°C, 950°C e 1050°C.

	CP	LU	LSN	LSE	LQ	RSN	RSE	RQ	P.F
850°C	A1	96,39	93,39	93,24	92,40	3,21	3,38	0,91	8,13
	A2	95,02	92,02	91,40	90,62	3,26	3,96	0,86	8,06
	A4	92,23	89,23	88,81	88,01	3,36	3,85	0,91	8,09
	A6	94,86	91,86	92,27	90,96	3,27	2,81	1,44	8,32
	D. PAD.	1,51	1,51	1,65	1,58	0,05	0,46	0,24	0,10
	MEDIA	94,63	91,63	91,43	90,50	3,28	3,50	1,03	8,15
	5(1)	90,87	87,97	87,95	87,32	3,30	3,32	0,72	8,03
	5(2)	92,50	89,60	89,51	88,87	3,24	3,34	0,72	8,13
	5(3)	93,84	90,94	90,48	89,79	3,19	3,71	0,77	8,11
	5(4)	92,63	89,73	89,49	88,79	3,23	3,51	0,79	8,11
	D. PAD.	1,06	1,06	0,91	0,88	0,04	0,16	0,03	0,04
	MEDIA	92,46	89,56	89,36	88,69	3,24	3,47	0,75	8,10
	10(1)	93,17	90,57	90,36	90,33	2,87	3,11	0,03	7,47
	10(2)	93,28	90,68	90,51	90,10	2,87	3,06	0,46	7,85
	10(3)	90,82	88,22	88,07	87,37	2,95	3,12	0,80	7,81
	10(4)	94,07	91,47	91,35	90,75	2,84	2,98	0,66	7,45
	D. PAD.	1,21	1,21	1,22	1,33	0,04	0,06	0,29	0,19
	MEDIA	92,84	90,24	90,07	89,64	2,88	3,07	0,49	7,64
	15(1)	95,44	92,83	91,92	91,81	2,81	3,83	0,12	6,92
	15(2)	92,80	90,19	89,80	89,69	2,89	3,34	0,12	6,98
	15(4)	94,89	92,28	91,64	91,33	2,83	3,55	0,34	6,96
	15(5)	95,59	92,98	92,35	91,74	2,81	3,51	0,66	7,37
	D. PAD.	1,12	1,12	0,97	0,86	0,03	0,18	0,22	0,18
	MEDIA	94,68	92,07	91,43	91,14	2,84	3,56	0,31	7,06
	20(2)	92,99	90,69	90,34	90,33	2,54	2,93	0,01	6,94
	20(3)	95,42	93,12	92,48	92,09	2,47	3,18	0,42	6,58
	20(4)	93,08	90,78	90,27	89,91	2,53	3,11	0,40	7,20
	20(5)	94,30	92,00	91,86	91,52	2,50	2,66	0,37	7,01
D. PAD.	1,00	1,00	0,96	0,88	0,03	0,20	0,17	0,22	
MEDIA	93,95	91,65	91,24	90,96	2,51	2,97	0,30	6,93	
950°C	A5	94,48	91,48	91,26	89,79	3,28	3,53	1,64	8,95
	A7	93,57	91,12	90,32	89,03	2,87	3,11	0,03	8,90
	A8	93,68	93,40	92,90	91,45	2,87	3,06	0,46	8,87

950°C	A9	91,22	92,34	92,13	90,55	2,95	3,12	0,80	8,90
	D. PAD.	1,22	0,88	0,96	0,90	0,17	0,19	0,59	0,03
	MEDIA	93,24	92,09	91,65	90,21	2,99	3,21	0,73	8,90
	5(5)	92,60	89,70	89,28	88,17	3,23	3,72	1,26	8,74
	5(6)	92,75	89,85	89,79	88,57	3,23	3,30	1,38	8,69
	5(8)	95,73	92,83	92,78	91,65	3,12	3,18	1,23	8,71
	5(9)	93,44	90,54	90,22	89,08	3,20	3,57	1,28	8,74
	D. PAD.	1,25	1,25	1,35	1,36	0,04	0,21	0,05	0,02
	MEDIA	93,63	90,73	90,52	89,37	3,20	3,44	1,29	8,72
	10(5)	92,70	89,22	89,18	87,88	3,90	3,64	1,48	8,52
	10(6)	94,57	89,13	88,64	87,50	6,10	3,23	1,30	8,48
	10(7)	95,45	89,2	89,06	87,87	7,01	3,00	1,35	8,48
	10(8)	91,66	90,42	89,84	88,81	1,37	2,72	1,16	8,50
	D. PAD.	1,49	0,54	0,43	0,48	2,18	0,34	0,11	0,02
	MEDIA	93,60	89,49	89,18	88,02	4,60	3,15	1,32	8,49
	15(6)	92,71	92,15	91,11	89,97	2,83	3,43	1,27	7,90
	15(7)	92,81	90,61	90,57	89,29	2,88	3,56	1,43	7,88
	15(9)	94,94	92,33	92,31	91,50	2,83	2,85	0,89	7,71
	15(10)	92,71	90,1	89,45	88,6	2,90	3,64	0,96	7,73
	D. PAD.	0,95	0,96	1,03	1,07	0,03	0,31	0,22	0,09
	MEDIA	93,29	91,30	90,86	89,84	2,86	3,37	1,14	7,81
	20(6)	94,27	91,97	91,32	90,43	2,50	3,23	0,98	7,66
	20(7)	95,15	92,85	92,38	91,36	2,48	3,00	1,12	7,53
	20(8)	91,36	89,06	88,94	87,85	2,58	2,72	1,24	7,58
20(9)	92,96	90,66	90,33	89,25	2,54	2,91	1,21	7,60	
D. PAD.	1,43	1,43	1,27	1,31	0,04	0,18	0,10	0,05	
MEDIA	93,44	91,14	90,74	89,72	2,52	2,97	1,14	7,59	
1050°C	A10	95,21	92,21	90,95	87,46	3,25	4,68	3,99	9,29
	A11	91,75	88,75	88,66	84,84	3,38	3,49	4,50	9,40
	A12	93,41	90,41	90,11	85,64	3,32	3,66	5,22	9,40
	A13	94,76	91,76	91,36	87,06	3,27	3,72	4,94	9,56
	D. PAD.	1,35	1,35	1,03	1,06	0,05	0,47	0,46	0,10
	MEDIA	93,78	90,78	90,27	86,25	3,31	3,89	4,66	9,41
	5(10)	93,70	90,80	90,70	86,61	3,19	3,31	4,72	9,24
	5(11)	93,00	90,10	89,92	86,04	3,22	3,43	4,51	9,19
	5(12)	93,10	90,20	89,90	85,94	3,22	3,56	4,61	9,30
	5(15)	94,84	91,94	91,82	87,03	3,15	3,29	5,50	9,28
	D. PAD.	0,73	0,73	0,78	0,44	0,03	0,11	0,39	0,04
	MEDIA	93,66	90,76	90,59	86,41	3,20	3,40	4,84	9,25
	10(9)	92,14	89,54	89,31	85,28	2,90	3,17	4,73	9,01
	10(10)	94,90	92,30	90,57	86,73	2,82	4,78	4,43	9,01
	10(11)	91,90	89,3	88,8	84,84	2,91	3,49	4,67	9,19
	10(12)	91,75	89,15	88,77	84,81	2,92	3,36	4,67	9,01
	D. PAD.	1,29	1,29	0,73	0,78	0,04	0,63	0,11	0,08
	MEDIA	92,67	90,07	89,36	85,42	2,89	3,70	4,62	9,06
	15(12)	93,12	90,51	90,49	86,47	2,88	2,91	4,65	8,42
	15(13)	92,32	89,71	89,03	85,20	2,91	3,70	4,50	8,38
	15(15)	94,76	92,15	91,76	87,81	2,83	3,27	4,50	8,43
	15(16)	95,25	92,64	92,44	89,2	2,82	3,04	3,63	8,35
	D. PAD.	1,19	1,19	1,30	1,49	0,04	0,30	0,40	0,03
	MEDIA	93,86	91,25	90,93	87,17	2,86	3,23	4,32	8,40
20(10)	91,28	88,98	88,19	84,69	2,58	3,50	4,13	8,08	
20(11)	93,46	91,16	91,16	87,16	2,52	2,52	4,59	8,14	
20(12)	94,76	92,46	92,08	88,65	2,49	2,91	3,87	8,22	

1050°C	20(13)	94,76	92,46	92,23	88,75	2,49	2,74	3,92	8,11
	D. PAD.	1,42	1,42	1,63	1,64	0,04	0,36	0,28	0,05
	MEDIA	93,57	91,27	90,92	87,31	2,52	2,92	4,13	8,14

CP = corpo de prova

A(x) = argila

5 (x)= adição de 5% de chamote

10 (x)= adição 10% de chamote

15 (x)= adição de 15% de chamote

20 (x)= adição de 20% de chamote

LU = comprimento úmido

LSN= comprimento após secagem natural

LSE= comprimento após secagem em estufa

LQ = comprimento após a queima

RSN = retração na secagem natural

RSE= retração após secagem em estufa

RQ = retração após a queima

Tabela A6 – Dados e valores para resistência à flexão em três pontos dos corpos de prova, nas temperaturas de 850°C, 950°C e 1050°C

850 °C	CP	b medio (mm)	e medio (mm)	F (Kgf)	(Kgf/cm ²)	Mpa
	A(1)	26,46	12,47	17	50	4,9
A(2)	26,89	12,46	19	56	5,4	
A(4)	26,80	12,53	18	51	5,0	
A(6)	26,83	12,39	14	41	4,0	
				D. PAD	0,5	
				MEDIA	4,8	
5(1)	27,17	12,59	13	36	3,6	
5(2)	26,98	12,65	16	44	4,3	
5(3)	26,97	12,67	16	43	4,2	
5(4)	27,00	12,48	15	44	4,3	
				D. PAD	0,3	
				MEDIA	4,1	
10(1)	27,24	12,53	18	49	4,8	
10(2)	27,23	12,54	12	35	3,4	
10(3)	27,05	12,44	20	58	5,6	
10(4)	27,30	12,70	19	53	5,2	
				D. PAD	0,8	
				MEDIA	4,8	
15(1)	27,33	12,88	13	35	3,4	
15(2)	27,54	13,01	13	34	3,3	
15(4)	27,34	12,79	12	32	3,1	
15(5)	27,31	12,82	14	37	3,6	
				D. PAD	0,2	
				MEDIA	3,4	
20(2)	27,66	12,83	12	31	3,0	
20(3)	27,76	13,49	12	29	2,9	
20(4)	27,24	12,74	10	27	2,7	

	20(5)	27,42	12,78	14	38	3,7	
					D. PAD	0,4	
					MEDIA	3,1	
950°C	A(5)	26,70	12,51	20	57	5,5	
	A(7)	26,85	12,54	22	63	6,2	
	A(8)	26,72	12,28	19	57	5,5	
	A(9)	26,85	12,54	22	63	6,2	
						D. PAD	0,3
						MEDIA	5,9
	5(5)	26,77	12,42	19	55	5,4	
	5(6)	26,89	12,56	19	54	5,3	
	5(8)	26,91	12,68	19	53	5,2	
	5(9)	26,83	12,39	19	55	5,4	
						D. PAD	0,1
						MEDIA	5,3
	10(5)	26,99	12,47	28	79	7,8	
	10(6)	26,88	12,41	26	76	7,5	
	10(7)	26,93	12,67	23	64	6,3	
	10(8)	26,95	12,57	26	74	7,2	
						D. PAD	0,6
						MEDIA	7,2
	15(6)	27,08	12,61	18	52	5,0	
	15(7)	27,01	12,75	17	46	4,5	
	15(9)	27,19	12,85	17	46	4,5	
	15(10)	26,96	12,55	15	43	4,2	
						D. PAD	0,3
						MEDIA	4,6
	20(6)	27,50	12,66	17	47	4,6	
	20(7)	27,52	12,80	17	45	4,4	
	20(8)	27,51	12,55	15	43	4,2	
	20(9)	27,29	12,65	22	60	5,9	
						D. PAD	0,7
						MEDIA	4,8
1050°C	A10	25,87	11,95	31	100	9,8	
	A11	25,73	11,96	28	91	8,9	
	A12	25,66	11,98	33	107	10,5	
	A13	25,71	11,89	23	77	7,5	
						D PAD	1,1
						MEDIA	9,2
	5(10)	25,87	12,06	27	86	8,4	
	5(11)	25,78	11,94	30	97	9,5	
	5(12)	25,88	12,05	27	86	8,4	
	5(15)	25,82	12,08	27	87	8,5	
						D. PAD	0,5
						MEDIA	8,7
	10(9)	25,89	11,93	36	117	11,5	
	10(10)	25,90	11,93	34	111	10,9	
	10(11)	25,76	12,05	34	110	10,8	
	10(12)	25,83	12,01	30	98	9,6	
						D. PAD	0,7
						MEDIA	10,7
	15(12)	26,09	12,08	26	81	7,9	
	15(13)	25,57	12,11	23	75	7,3	
15(15)	26,33	12,02	24	75	7,3		
15(16)	26,45	12,37	23	67	6,6		

					D. PAD	0,5
					MEDIA	7,3
	20(10)	26,40	12,52	24	70	6,8
1050°C	20(11)	26,44	12,42	23	68	6,7
	20(12)	26,41	12,35	21	62	6,0
	20(13)	26,40	12,33	23	70	6,9
					D. PAD	0,3
					MEDIA	6,6

APÊNDICE B – TABELAS E GRÁFICOS DE REFERÊNCIA (SOUZA SANTOS, 1989)

Tabela B1- Valores limites recomendados (SOUZA SANTOS, 1989)

Massa Cerâmica (manual, extrudada, prensada)	Para tijolos de alvenaria	Para tijolos furados	Para telhas	Para ladrilhos de piso vermelho
Tensão de ruptura da massa seca a 110°C (mínima)	15 kgf/cm ²	25 kgf/cm ²	30 kgf/cm ²	-
Tensão de ruptura após a queima (mínima)	20 kgf/cm ²	55 kgf/cm ²	65 kgf/cm ²	-
Absorção de água após a queima (máxima)	-	25,0 %	20,0 %	Abaixo de 1,0%
Cor após a queima	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha sem manchas pretas

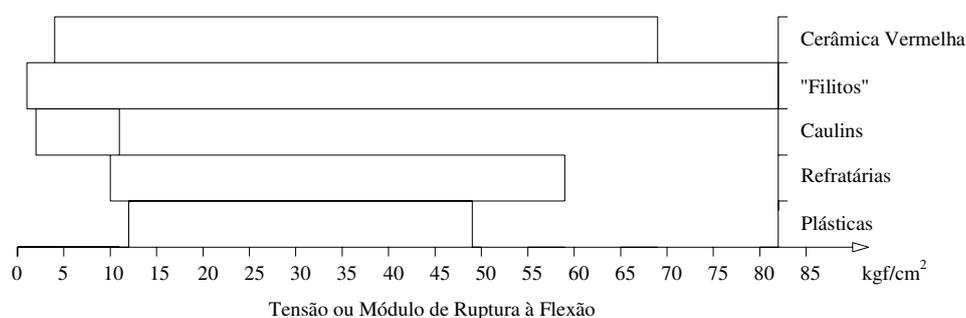


Gráfico B1 - Faixa de variação da tensão de ruptura à flexão das argilas padrão brasileiras após secagem a 110° C (Souza Santos, 1989)

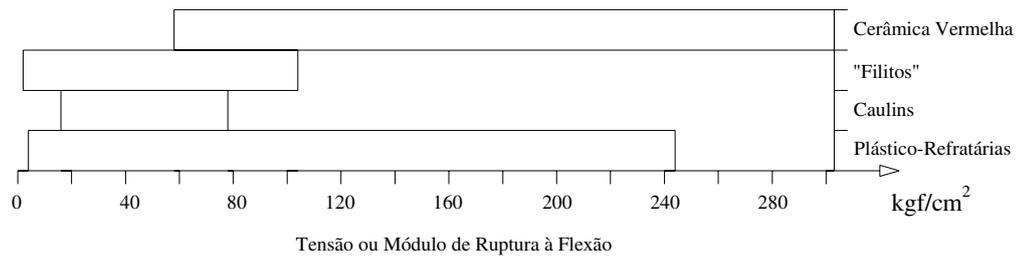


Gráfico B2 - Faixa de variação da tensão de ruptura à flexão das argilas padrão brasileiras após queima a 950° C (Souza Santos, 1989)

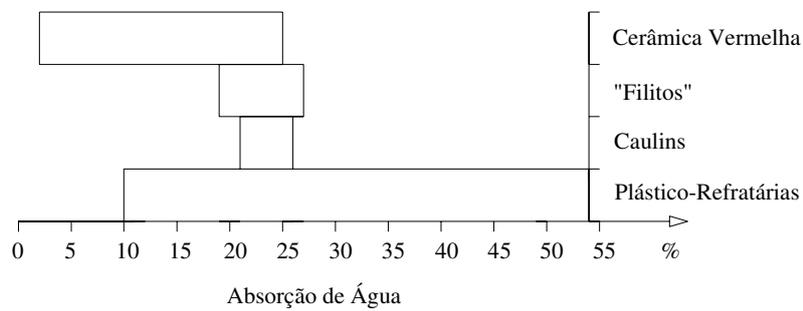


Gráfico B3 - Faixa de variação da absorção de água das argilas padrão brasileiras após queima a 950° C (Souza Santos, 1989)

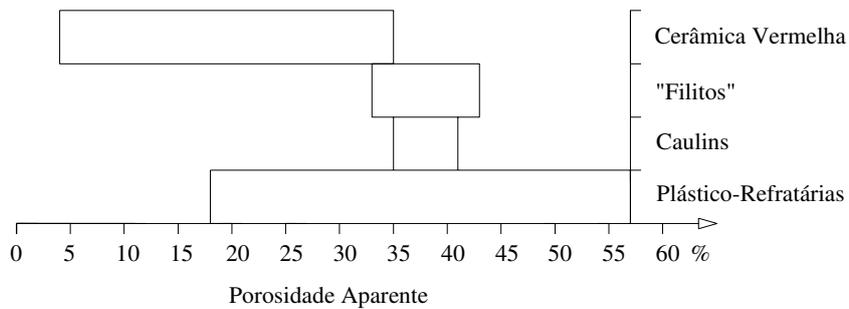


Gráfico B4 - Faixa de variação da porosidade aparente das argilas padrão brasileiras após queima a 950° C (Souza Santos, 1989)

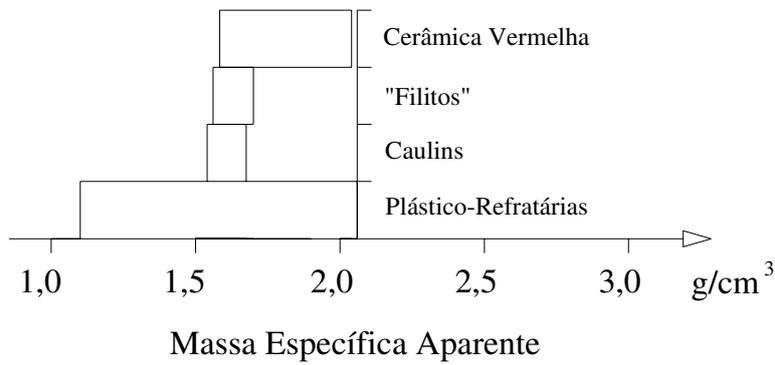


Gráfico B5 - Faixa de variação da massa específica aparente das argilas padrão brasileiras após queima a 950° C (Souza Santos, 1989)

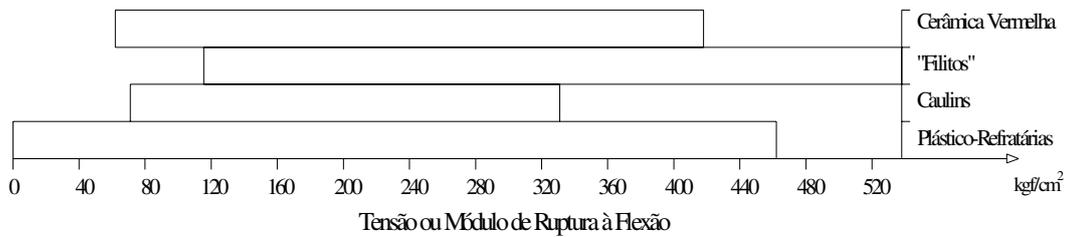


Gráfico B6 - Faixa de variação da tensão de ruptura à flexão das argilas padrão brasileiras após queima a 1250° C (Souza Santos, 1989)

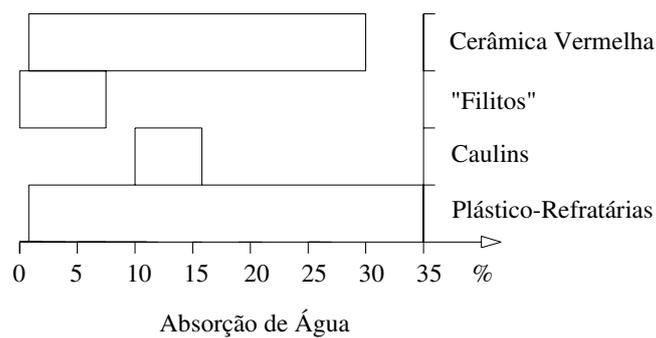


Gráfico B7- Faixa de variação da absorção de água das argilas padrão brasileiras após queima a 1250° C (Souza Santos, 1989)

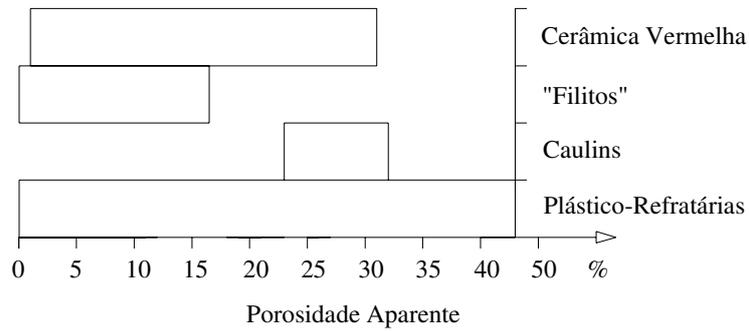


Gráfico B8- Faixa de variação da porosidade aparente das argilas padrão brasileiras após queima a 1250° C (Souza Santos, 1989)

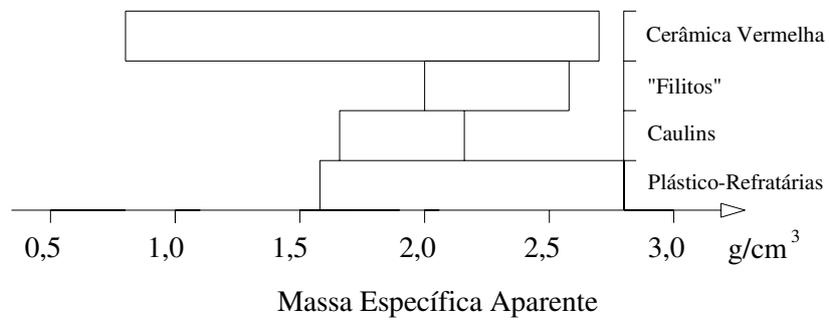


Gráfico B9 - Faixa de variação da massa específica aparente das argilas padrão brasileiras após queima a 1250° C (Souza Santos, 1989)