



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MASSAS
CERÂMICAS INDUSTRIAIS E ADITIVADAS
PARA USO EM BLOCOS CERÂMICOS**

TESE DE DOUTORADO

Reginaldo Severo de Macedo

Campina Grande – Paraíba

Abril de 2005



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MASSAS CERÂMICAS INDUSTRIAIS E ADITIVADAS PARA USO EM BLOCOS CERÂMICOS

Reginaldo Severo de Macedo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Engenharia de Processos**.

Área de concentração: Materiais

Orientadores:

Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira

Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Campina Grande – Paraíba

Abril de 2005

UFCG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS



UFCG

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MASSAS
CERÂMICAS INDUSTRIAIS E ADITIVADAS
PARA USO EM BLOCOS CERÂMICOS

Reginaldo Severo de Macedo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M141e 2005 Macedo, Reginaldo Severo de
 Estudo comparativo entre massas cerâmicas industriais e aditivadas para uso em blocos cerâmicos / Reginaldo Severo de Macedo. — Campina Grande: UFCG, 2005.
 125f.: il. col.

Inclui Bibliografia.
 Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
 Orientadores: Heber Carlos Ferreira e Gelmires de Araújo Neves

1— Aditivos 2— Plasticidade 3— Massa cerâmica vermelha I— Título

CDU 666.3-184.2

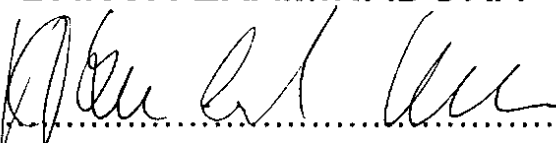
UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS 1	
575	07-06-05

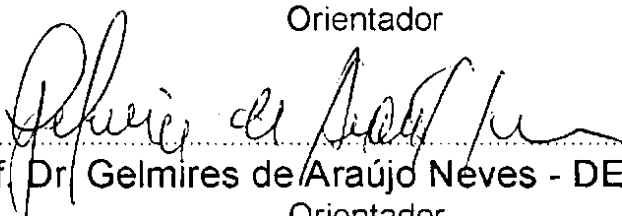
**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MASSAS CERÂMICAS
INDUSTRIAIS E ADITIVADAS PARA USO EM BLOCOS CERÂMICOS**

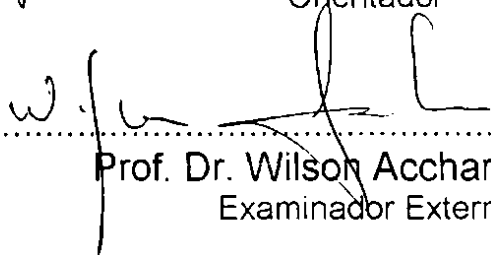
Reginaldo Severo de Macedo

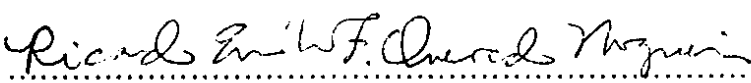
Tese Aprovada em, 28/04/2005


BANCA EXAMINADORA



.....
Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira - DEMa/UFCG
Orientador


.....
Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves - DEMa/UFCG
Orientador


.....
Prof. Dr. Wilson Acchar – UFRN
Examinador Externo


.....
Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira - UFCE
Examinador Externo


.....
Prof. Dr. Hélio de Lucena Lira – DEMa/UFCG
Examinador Interno


.....
Profa. Dra. Lisiane Navarro de Lima Santana – DEMa/UFCG
Examinadora Interna

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Augusto (in memoriam) e Iracema.

À minha esposa Zélia Lúcia e
aos meus filhos Luiz Augusto, Lisandra e Daniele.

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento ao maior e mais humilde de todos os mestres, Jesus, Senhor e consumidor da minha fé, por guiar meus passos a cada dia de minha vida, permitindo-me a realização deste empreendimento acadêmico.

Ao prof. Dr. Heber Carlos Ferreira (orientador), o meu reconhecimento e gratidão pelas valiosas discussões teóricas que me possibilitaram reflexão e amadurecimento no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves (orientador) pela orientação técnica dos ensaios e desta pesquisa.

A minha irmã, profa. Dra. Maria Augusta Macêdo, pelo apoio, incentivo e revisão do texto.

À Chefia do DEMa/CCT/UFCG, pela minha liberação das atividades acadêmicas e pela colocação dos Laboratórios de Engenharia de Materiais para realização da maioria dos ensaios necessários à conclusão desta pesquisa.

À coordenação do Laboratório de Solos I do Departamento de Engenharia Civil do CCT/UFCG, por ceder espaço para a realização de alguns ensaios necessários à conclusão desta pesquisa.

À Coordenação do Doutorado em Engenharia de Processos, pelas condições oferecidas para que esta tese fosse concluída.

Ao técnico Edvaldo, pelo apoio na realização dos ensaios de plasticidade.

Aos estudantes Kludson Antonio, Ernesto, Klevson Ranniet, Juliana Xavier, Mariana Guerra e Vívian Richele, alunos de graduação de Engenharia de Materiais do CCT/UFCG, na qualidade de voluntários, deram sua parcela de contribuição na preparação de amostras para a realização de alguns ensaios.

As Indústrias Cerâmicas: CINCERA; Espírito Santo; João Ribeiro; Jardim e Barra, pelo fornecimento das amostras de massa plástica vermelha para realização desta pesquisa.

À ATECEL, pelo o apoio no transporte das amostras.

A todos aqueles que diretos e indiretamente colaboraram para a conclusão desta pesquisa.

Publicações sobre o tema da tese

i) Artigo publicado em anais de congresso nacional

1. MACEDO, R. S., BARBOZA, K. R., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C. **Influência de aditivos na plasticidade e extrudabilidade de argilas plásticas para uso na confecção de blocos cerâmicos: Parte I.** In. *ANAIS DO 48º. CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, Curitiba – PR, 2004.

ii) Artigos no prelo

1. MACEDO, R. S., PONTES, M. K. G., SANTOS, V. R. G., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C. **Influência de aditivos na plasticidade e extrudabilidade de massas plásticas para uso na confecção de blocos cerâmicos. Parte II: características físicas e mineralógicas.** In. *ANAIS DO 49º. CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, São Pedro - SP, 2005.

2. MACEDO, R. S., FARIAS, J. X. N., FARIAS, K. A. S., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C. **Influência de aditivos na plasticidade e extrudabilidade de massas plásticas para uso na confecção de blocos cerâmicos. Parte III: propriedades físico-mecânicas.** In: *ANAIS DO 49º. CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, São Pedro - SP, 2005.

SUMÁRIO

Dedicatória.....	i
Agradecimentos.....	ii
Publicações sobre o tema da tese.....	iii
Sumário.....	iv
Lista de Abreviaturas.....	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xii
Resumo.....	xiv
Abstract.....	xv
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Justificativa e objetivos.....	3
1.2 – Organização do trabalho.....	4
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 – Cerâmica vermelha: Breve histórico.....	6
2.2 – Argila para cerâmica vermelha.....	7
2.3 – Preparação da matéria-prima e da massa.....	9
2.4 – Análise granulométrica.....	12
2.5 – Plasticidade.....	15
2.6 – Conformação.....	23
2.6.1 – Processo de prensagem.....	23
2.6.2 – Processo de extrusão.....	24
2.7 – Uso de aditivos em processamentos cerâmicos.....	29
2.7.1 – Ligantes.....	32
2.7.2 – Defloculantes.....	35
2.7.3 - Plastificantes.....	35
2.7.4 – Surfactantes.....	37
2.7.5 – Características reológicas da mistura.....	39
2.8 – Blocos cerâmicos.....	40
2.8.1 – Tipos.....	41
2.8.2 – Vantagens.....	41
2.8.3 – Principais índices de qualidade.....	42

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 – MATERIAIS.....	43
3.1.1 – Massas industriais e blocos cerâmicos.....	43
3.1.2 – Aditivos.....	44
3.2 – MÉTODOS.....	46
3.2.1 – Caracterização física e mineralógica.....	46
3.2.1.1 – Análise granulométrica	46
3.2.1.2 – Índices de Atterberg.....	47
3.2.1.3 – Análise química (AQ).....	48
3.2.1.4 – Análises térmicas (ATD e ATG).....	48
3.2.1.5 – Difração de raios-X (DR-X).....	49
3.2.2 – Caracterização tecnológica preliminar.....	50
3.2.2.1 – Preparação das massas.....	50
3.2.2.2 – Conformação por prensagem	50
3.2.2.3 - Propriedades físico-mecânicas.....	51
3.2.3 – Caracterização tecnológica completa com massas industriais e aditivadas.....	51
3.2.3.1 – Índices de Atterberg com massas aditivadas.....	51
3.2.3.2 – Preparação das massas.....	51
3.2.3.3 – Moldagem por extrusão.....	52
3.2.4 – Blocos cerâmicos.....	52
3.2.4.1 - Preparação dos corpos de prova.....	52
3.2.4.2 – Propriedades físico-mecânicas.....	53
 CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE OS ENSAIOS COM AS MASSAS INDUSTRIAIS.....	 54
4.1 – Caracterização física e mineralógica.....	54
4.1.1 – Análise granulométrica.....	54
4.1.2 – Índices de Atterberg.....	56
4.1.3 – Análise química (AQ).....	57
4.1.4 – Análises térmicas (ATD e ATG).....	58
4.1.5 – Difração de raios X (DR-X).....	60
4.2 - Caracterização tecnológica preliminar.....	62

4.2.1 – Conformação por prensagem.....	62
4.2.2 - Propriedades físico-mecânicas.....	63
4.3 - Caracterização tecnológica completa.....	67
4.3.1 – Conformação por extrusão	67
4.3.2 - Propriedades físico-mecânicas.....	67
4.4 – Conclusões parciais.....	71
4.4.1 – Ensaio de caracterização física e mineralógica.....	71
4.4.2 – Caracterização tecnológica.....	72
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE OS ENSAIOS COM AS MASSAS ADITIVADAS.....	74
5.1 - Índices de Atterberg.....	74
5.2 – Conformação por extrusão.....	83
5.3 - Propriedades físico-mecânicas.....	84
5.4 – Estudo comparativo das propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova extrudados com massas industriais e com massas aditivadas.....	91
5.5 – Conclusões parciais.....	93
CAPÍTULO VI - RESULTADOS E DISCUSSÃO COM OS BLOCOS CERÂMICOS.....	95
6.1 – Características físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos	95
6.2 - Propriedades físico-mecânicas em corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos	97
6.3 – Estudo comparativo das propriedades físico-mecânicas entre os corpos de prova extrudados em laboratório com as massas industriais, as aditivadas e os retirados dos blocos cerâmicos industrializados.....	98
6.4 – Conclusões parciais.....	102
7 – CONCLUSÕES FINAIS.....	103
8 - SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	105
9 - FONTES CONSULTADAS.....	106
ANEXO I	
Tabelas construídas com base nos resultados dos ensaios laboratoriais.....	113
ANEXO II	
Relação das indústrias cerâmicas que forneceram o material para pesquisa	124

LISTA DE ABREVIATURAS

- A – Amostra A
- B – Amostra B
- C – Amostra C
- D – Amostra D
- E – Amostra E
- AA – Absorção de Água
- ABC – Associação Brasileira de Cerâmica
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACS – American Ceramic Society
- ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica
- AQ – Análise Química
- ATD – Análise Térmica Diferencial
- ATG – Análise Termogravimétrica
- BUN – Bentonite União Nordeste
- CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba
- CCT – Centro de Ciências e Tecnologia
- CTC – Centro de Tecnologia Cerâmica
- CMC – Carboximetilcelulose
- CINCERA – Companhia Industrial Cerâmica
- DEC – Departamento de Engenharia Civil
- DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais
- DEQ – Departamento de Engenharia Química
- DR-X – Difração de Raios-X
- FIEP – Federação das Indústrias do Estado da Paraíba
- NBR – Norma Brasileira
- MEA – Massa Específica Aparente
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- PA – Porosidade Aparente
- PF – Perda ao Fogo
- RCS – Resistência à Compressão Simples
- RLS – Retração Linear de Secagem

RLQ – retração Linear de Queima

TQ – Temperatura de Queima

TRF – Tensão de Ruptura à Flexão

UE – Umidade de Extrusão

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

UP – Umidade de Prensagem

VR – Valor de Referência

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Efeito da qualidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórico; (c) deficiência de partículas pequenas (d) deficiência de partículas grande e (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.....	14
Figura 2.2	Diagrama de Winkler de distribuição granulométrica.....	15
Figura 2.3	Curva de tensão e deformação teórica de uma massa plástica cerâmica.....	19
Figura 2.4	Esquema dos estados de consistência e suas fronteiras.....	22
Figura 2.5	Modelo de carta de plasticidade proposto por Casagrande.....	22
Figura 2.6	Corte de uma extrusora de dupla hélice, com o respectivo gráfico de pressões exercidas no seu interior e a identificação das diferentes zonas.....	28
Figura 2.7	Modelo de (a) estrutura de uma molécula surfactante; (b) sua adsorção orientada no sistema água-óleo e (c) a interface água-ar.....	38
Figura 3.1	Fluxograma dos ensaios realizados com as massas industriais e aditivadas.....	47
Figura 3.2	Aparelho analisador de tamanho de partículas por difração a laser – granulômetro - modelo 1064 LD da Cilas.....	46
Figura 3.3	Aparelho de análises térmicas, modelo RB 3000 da BP Engenharia.....	49
Figura 3.4	Aparelho de difração de raios X, modelo XRD 6000 da Shimadzu	49
Figura 3.5	Foto da masseira.....	52
Figura 3.6	Fluxograma dos ensaios realizados com os corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos.....	53
Figura 4.1	Distribuição granulométrica das massas estudadas por tamanho de partícula a laser.....	55
Figura 4.2	Curvas simultâneas de ATD e ATG: (a) amostra A ; (b) amostra B ; (c) amostra C ; (c) amostra D e (e) amostra E	59
Figura 4.3	Difratogramas de raios-X das massas industriais.....	62

Figura 4.4	Gráficos das propriedades físico-mecânicas das amostras prensadas e secas a 110°C: (a) umidade de prensagem; (b) retração linear de secagem e (c) tensão de ruptura à flexão.....	64
Figura 4.5	Gráficos das propriedades físico-mecânicas das amostras prensadas e sinterizadas: (a) absorção de água; (b) porosidade aparente e (c) tensão de ruptura à flexão.....	66
Figura 4.6	Gráficos das propriedades físico-mecânicas das amostras extrudadas e secas a 110°C: (a) umidade de extrusão; (b) retração linear de secagem e (c) tensão de ruptura à flexão.....	68
Figura 4.7	Gráficos das propriedades físico-mecânicas das amostras extrudadas e sinterizadas: (a) absorção de água; (b) porosidade aparente e (c) tensão de ruptura à flexão.....	70
Figura 5.1	Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra A : (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.....	75
Figura 5.2	Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra B : (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.....	76
Figura 5.3	Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra C : (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.....	77
Figura 5.4	Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra D : (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.....	78
Figura 5.5	Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra E : (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.....	79
Figura 5.6	Umidade de extrusão das amostras aditivadas e industriais, secas a 110°C: (a) amostra A ; (b) amostra B ; (c) amostra C ; (d) amostra D e (e) amostra E	85
Figura 5.7	Retração linear de secagem das amostras aditivadas e industriais, secas a 110°C: (a) amostra A ; (b) amostra B ; (c) amostra C ; (d) amostra D e (e) amostra E	86

Figura 5.8	Tensão de ruptura à flexão das amostras aditivadas e industriais, secas a 110°C: (a) amostra A ; (b) amostra B ; (c) amostra C ; (d) amostra D e (e) amostra E	87
Figura 5.9	Absorção de água das amostras aditivadas e industriais, sinterizadas às temperaturas de 800, 900 e 1000°C: (a) amostra A ; (b) amostra B ; (c) amostra C ; (d) amostra D e (e) amostra E	89
Figura 5.10	Tensão de ruptura à flexão das amostras aditivadas e industriais, sinterizadas às temperaturas de 800, 900 e 1000°C: (a) amostra A ; (b) amostra B ; (c) amostra C ; (d) amostra D e (e) amostra E	90
Figura 6.1	Gráficos das características físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos industrializados: (a) absorção de água e (b) resistência à compressão simples.....	96
Figura 6.2	Gráficos das propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos industrializados: (a) absorção de água; (b) porosidade aparente, (c) massa específica aparente e (d) tensão de ruptura à flexão.....	98
Figura 6.3	Gráficos comparativos dos resultados da absorção de água entre os corpos de prova confeccionados em laboratório com as massas industriais, as aditivadas e os retirados dos blocos: (a) amostra A ; (b) amostra B ; (c) amostra C ; (d) amostra D e (e) amostra E	100
Figura 6.4	Gráficos comparativos dos resultados da tensão de ruptura à flexão entre os corpos de prova confeccionados em laboratório com as massas industriais, as aditivadas e os retirados dos blocos: (a) amostra A ; (b) amostra B ; (c) amostra C ; (d) amostra D e (e) amostra E	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Tipos de ligantes.....	32
Tabela 2.2	Plastificantes mais utilizados.....	36
Tabela 2.3	Exemplos de surfactantes.....	38
Tabela 3.1	Umidade de extrusão de cada uma das unidades fabris.....	52
Tabela 4.1	Tamanho de partículas por difração a laser.....	56
Tabela 4.2	Índices de Atterberg das massas industriais.....	57
Tabela 4.3	Composição química das massas industriais analisadas.....	57
Tabela 4.4	Cores das amostras de massa industrial para cerâmica vermelha, processadas por prensagem e extrusão, após tratamentos térmicos a 110°C, 800°C, 900°C e 1000°C.....	63
Tabela 4.5	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com massa industrial, moldados por prensagem e secos à temperatura de 110°C.....	114
Tabela 4.6	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com massa industrial, moldados por prensagem e sinterizados às temperaturas de 800, 900 e 1000°C	114
Tabela 4.7	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com massa industrial, extrudados e secos à temperatura de 110°C.....	115
Tabela 4.8	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com massa industrial, extrudados e sinterizados às temperaturas de 800, 900 e 1000°C	115
Tabela 5.1	Índices de Atterberg da amostra A aditivada.....	116
Tabela 5.2	Índices de Atterberg da amostra B aditivada.....	116
Tabela 5.3	Índices de Atterberg da amostra C aditivada.....	117
Tabela 5.4	Índices de Atterberg da amostra D aditivada.....	117
Tabela 5.5	Índices de Atterberg da amostra E aditivada.....	118
Tabela 5.6	Resumo do efeito dos aditivos no limite de plasticidade.....	81
Tabela 5.7	Substâncias químicas e teores que provocaram as alterações mais significantes no limite de plasticidade.....	82
Tabela 5.8	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa aditivada, moldados por extrusão e secos à temperatura de 110°C.....	119

Tabela 5.9	Redução na água de extrusão provocada pelo uso dos aditivos..	84
Tabela 5.10	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa aditivada, extrudados e sinterizados à temperatura de 800°C.....	120
Tabela 5.11	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa aditivada, extrudados e sinterizados à temperatura de 900°C.....	121
Tabela 5.12	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa aditivada, extrudados e sinterizados à temperatura de 1000°C.....	122
Tabela 6.1	Valores das características físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos industrializados.....	123
Tabela 6.2	Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos industrializados.....	123

RESUMO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MASSAS CERÂMICAS INDUSTRIAIS E ADITIVADAS PARA USO EM BLOCOS CERÂMICOS

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir para o estudo das massas plásticas para confecção de blocos cerâmicos com vistas ao uso na construção civil. São objetivos específicos do estudo: a) caracterizar física e mineralogicamente massas plásticas industriais; b) determinar as características de plasticidade em massas plásticas para cerâmica vermelha tratada com aditivos químicos; c) realizar ensaios tecnológicos com massas plásticas industriais e aditivadas; d) comparar os resultados quanto às propriedades físico-mecânicas entre corpos de prova extrudados em laboratório com as massas industriais e as aditivadas; e) comparar as propriedades físico-mecânicas obtidas em corpos de prova retirados de blocos cerâmicos industrializados, com os corpos de prova confeccionados em laboratório, com as massas cerâmicas industriais e as aditivadas; f) realizar ensaios de caracterização física e mecânica em blocos cerâmicos industriais obtidos com as massas em estudo em fábrica, frente às normas da ABNT. Para viabilizar este estudo, cinco amostras de massas plásticas industriais para cerâmica vermelha foram submetidas a ensaios de caracterização física e mineralógica (análise granulométrica por difração a laser; ensaios de plasticidade, com massas industriais e aditivadas; análise química; análises térmicas e difração de raios X) e a ensaios tecnológicos (preliminares e completos) em corpos de prova extrudados, para determinação das propriedades físico-mecânicas em massas industriais e aditivadas. Os resultados das caracterizações físicas e mineralógicas com massas industriais estão de acordo com resultados já obtidos na literatura com massas plásticas para cerâmica vermelha da região. Os ensaios de plasticidade com as massas aditivadas mostraram uma significativa redução de até 21,57% no limite de plasticidade, resultando em um menor percentual de água de conformação. Para as propriedades físico-mecânicas, os resultados mostraram que os valores estão dentro da faixa usual para cerâmica vermelha. A comparação dos resultados das propriedades físico-mecânicas em corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos, com os valores determinados em laboratório, revelou que a maior aproximação obtida com os corpos de prova queimados se deu à temperatura de 900°C, resultando em uma melhoria nas propriedades físico-mecânicas, o que atende aos valores mínimos especificados na literatura consultada. Quanto aos blocos cerâmicos analisados, todas as amostras atendem à faixa de valores especificados para a *absorção de água*. Para *resistência à compressão simples*, apenas uma amostra não satisfaz à especificação da ABNT.

Palavras-chave: Aditivos, plasticidade, massa cerâmica vermelha.

ABSTRACT

COMPARATIVE STUDY BETWEEN INDUSTRIAL CERAMIC PASTES WITH AND WITHOUT ADDITIVES USED TO PRODUCE CERAMIC BLOCKS

The aim of this work is to contribute to the study of plastic pastes used to make red ceramic products, such as ceramic blocks to be used in civil construction. The specific aims are: a) to characterize physical and mineralogical the industrial ceramic plastic paste; b) to measure the plasticity characteristics with ceramic pastes used for red ceramic and treated with chemical additives; c) to make technological tests with industrial and ceramic paste and treated with additives; d) to compare the results with relationship to the mechanical and physical properties among test samples extruded in laboratory with the industrial masses and the additives; e) to compare the properties mechanic and physical obtained in of industrialized ceramic blocks, with the proof bodies made in laboratory, with the industrial ceramic masses and with additives; f) to make physical and mechanical characterization with industrial ceramic blocks produced in the industry with the same ceramic pastes and compare with the Brazilian norms (ABNT). Five samples of industrial paste used for red ceramic were submitted to a physical and mineralogical characterization (particle size by laser diffraction; thermal analysis and X-ray diffraction) and to technological tests (preliminary and complete) with extruded samples, to determine the physical and mechanical properties with industrial paste and with additives. The results from physical and mineralogical characterization with industrial paste are in accordance with the results from the literature, obtained for plastic paste used in red ceramics. The results from plasticity for the paste with additives showed a significant reduction (21.57%) in the plasticity limit, resulting in a small amount of processing water. The comparison of the mechanical and physical properties showed that the closest values were obtained when the samples were sintered in the laboratory at 900°C. This sintering gives an improvement in the mechanical and physical properties and reaches the minimum values established by the consulted literature. In relation to the analyzed ceramic blocks, all the samples are in accordance with the standard values to water absorption. Regarding the simple compression strength, only a sample did not reach the standard values of the Brazilian norms.

Key-words: Additives, plasticity, red ceramic mass

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

No Brasil, o início da fabricação de blocos cerâmicos e de outros produtos afins ocorreu nas primeiras décadas do século passado. Entretanto, foi somente na década de 30 que foram fabricados os primeiros blocos furados através de processos mecanizados. Atualmente, a indústria cerâmica de materiais de construção brasileira ocupa um lugar de destaque na economia do país, com um número aproximado de 12 mil olarias e cerâmicas de pequeno e médio porte. Geralmente formadas por estrutura simples e familiar, tais empresas buscam seu espaço no mercado nacional: 7,5 mil de blocos cerâmicos, que somadas, produzem 5,2 bilhões de unidades mensais e 4,5 mil de telhas, responsáveis pela produção 2,2 bilhões de peças por mês, gerando 650 mil empregos diretos e 2 milhões de empregos indiretos, resultando em uma produção anual aproximada de 60 milhões de peças, o que reserva para o setor um faturamento anual de R\$ 6 bilhões, fontes: (ABC, ANICER e CTC, 2004).

Conforme essas mesmas fontes, em que pese essa produção, o déficit nacional é de aproximadamente 7 milhões de residências. A grande maioria desse setor da indústria cerâmica usa lenha como combustível em seu processo produtivo, e tem baixa qualidade nos produtos, apresentando um atraso tecnológico em torno de 50 anos. E de acordo com os preceitos dos programas de qualidade em andamento na indústria da construção civil, toda a cadeia produtiva, incluindo os fornecedores, deve ser certificada, envolvendo assim as olarias no processo de certificação de seus produtos de acordo com as exigências das normas técnicas.

O Estado da Paraíba possui jazidas argiláceas distribuídas nas suas quatro meso-regiões, de acordo com a regionalização atual do IBGE: o Sertão, a Borborema, o Agreste e a Mata Paraibana, esta correspondendo ao Litoral. Há também várias bacias hidrográficas, a do Paraíba, a do Mamanguape, a do Espinharas, entre outras, com características bem distintas, sendo essas modeladas em rochas cristalinas, com exceção da bacia do rio do Peixe e das áreas da baixada

litorânea. De acordo com MENEZES et al. (2001), a faixa litorânea possui grande concentração de argilas para uso em cerâmica branca, enquanto que, no restante do Estado, há grande concentração de jazidas de argilas para uso em cerâmica vermelha.

Há em todo Estado, cerca de 60 fábricas de produtos de cerâmica vermelha em atividade, distribuídas em pelo menos 30 municípios, oferecendo cerca de 3.000 empregos diretos. O processo de fabricação, na maioria das fábricas, é simples, envolvendo uma mistura de um ou dois tipos de argila com água, passando em uma maromba com secagem natural, e a queima é feita usando lenha como combustível. O processo em sua totalidade, na maioria das cerâmicas não tem controle eficaz, e há imensas perdas em todas as suas fases, conforme estudos de CARVALHO et al. (2001).

Nos últimos anos, tem-se notado um crescente planejamento e instalação de indústrias de cerâmica vermelha, mas há dificuldades em obter informações técnicas e quantitativas, uma vez que não há um estudo completo das características cerâmicas das argilas para cerâmica vermelha em nosso Estado.

Estudos realizados por CHIARA, BORRONI e CHIARA (2000) têm demonstrado que, no processamento de materiais cerâmicos, diferentes aditivos devem ser incorporados na mistura para produzir um comportamento de fluxo e propriedades adequadas para a conformação. Nesse sentido o Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa/UFCG - tem realizado estudos com o objetivo de sanar lacunas existentes na metodologia proposta por SOUZA SANTOS (1992), para o estudo das argilas desconhecidas. É a falta de especificações relativas às características de plasticidade, que poderá ser parcialmente sanada através destes estudos propostos, que tratam especificamente das massas plásticas vermelhas para uso na confecção de blocos cerâmicos. Uma das preocupações desses estudos é com os efeitos de alguns aditivos químicos no limite de plasticidade de massas plásticas industriais usadas na fabricação de blocos cerâmicos do Estado da Paraíba, visando reduzir a quantidade de água necessária para desenvolver plasticidade. Com a redução da quantidade de água a um valor mínimo, de modo que não prejudique a trabalhabilidade da massa, a energia necessária para secar os blocos obtidos dessa massa por extrusão será também reduzida, e o processo será

mais econômico. Com esta nova metodologia de tratar as massas plásticas industriais com diferentes aditivos, foram determinados os valores do limite de plasticidade e da variação das propriedades físico-mecânicas de cada amostra, que possibilitou a indicação de alguns aditivos que causaram uma redução da quantidade de água necessária para a extrusão, sem prejuízo para as propriedades do bloco cerâmico. Adicionalmente foi feito um estudo paralelo das características físicas e mecânicas em blocos cerâmicos industriais obtidos com as massas em estudo em fábrica frente às normas da ABNT, os quais em sua maioria deram bons resultados.

Nesse contexto de busca de informações para a caracterização das massas cerâmicas na Paraíba, apresentamos a seguir a justificativa e os objetivos do presente estudo.

1.1 – Justificativa e Objetivos

Nos últimos anos, a tecnologia do processamento dos materiais de construção tem avançado rapidamente, visando garantir o fornecimento de processos dinâmicos e permanentes adequando as matérias-primas à situação global, dentro de um âmbito economicamente viável à realidade do setor e do mercado consumidor. Com efeito, estudos visando à otimização de matérias-primas para uso em cerâmica vermelha são necessários de forma a complementar a sistemática proposta por SOUZA SANTOS (1992), para estudos de argilas desconhecidas, e promover uma redução nos custos de produção.

A justificativa para o desenvolvimento da presente pesquisa deve-se à existência de poucos estudos sistemáticos de massas plásticas para cerâmica vermelha. Neste sentido, a pesquisa dá continuidade ao estudo das massas cerâmicas brasileiras para utilização na indústria de cerâmica vermelha, fornecendo informações acerca das massas plásticas utilizadas nas fábricas de blocos cerâmicos no Estado da Paraíba.

Nesta perspectiva, este trabalho tem o objetivo geral de estudar massas plásticas industriais para confecção de blocos cerâmicos com vistas ao uso na construção civil com os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar física e mineralogicamente massas plásticas industriais;
- b) determinar as características de plasticidade em massas plásticas para cerâmica vermelha tratadas com aditivos químicos;
- c) realizar ensaios tecnológicos com massas plásticas industriais e aditivadas;
- d) comparar os resultados quanto às propriedades físico-mecânicas entre corpos de prova extrudados em laboratório, com as massas industriais e aditivadas;
- e) comparar as propriedades físico-mecânicas obtidas em corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos industrializados, e em corpos de prova confeccionados em laboratório com massas industriais e aditivadas;
- f) realizar ensaios de caracterização física e mecânica em blocos cerâmicos industriais obtidos com as massas em estudo em fábrica, frente às normas da ABNT.

1.2 – Organização do Trabalho

Tendo em vista o alcance dos objetivos citados, o relato da pesquisa aqui apresentado está constituído de seis capítulos, além das conclusões, sugestões para novas pesquisas e das fontes consultadas.

O Capítulo I apresenta uma introdução descrevendo a justificativa, os objetivos e a organização do trabalho.

No Capítulo II, está descrita a revisão bibliográfica do tema em estudo com uma visão panorâmica da evolução histórica da cerâmica vermelha e um conjunto de modelos teórico-metodológicos adotados no processamento de produtos cerâmicos, usando plastificantes como aditivos naturais e sintéticos, na conformação de tais produtos.

O Capítulo III apresenta uma descrição dos materiais selecionados e a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. A metodologia contém ensaios de caracterização física, mineralógica e tecnológica das amostras em estudo, além dos ensaios físicos e mecânicos dos blocos cerâmicos industrializados.

No Capítulo IV, são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização física, mineralógica e tecnológica das amostras industriais em análise.

No Capítulo V, são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios de plasticidade e tecnológicos completos com as amostras aditivadas em análise, além do estudo comparativo entre os resultados obtidos através dos ensaios tecnológicos em corpos de prova extrudados com as massas industriais.

No Capítulo VI, são apresentados e discutidos os resultados da verificação das características físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos frente às normas da ABNT, além do estudo comparativo entre os resultados de laboratório e da indústria, obtidos através dos ensaios tecnológicos em corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos e das propriedades físico-mecânicas entre corpos de prova extrudados em laboratório.

As conclusões sumarizam os resultados mais relevantes da pesquisa e confrontam os objetivos propostos e os resultados alcançados.

Nas sugestões para novas pesquisas são apontadas alternativas para uso de aditivos químicos em massas para cerâmica vermelha.

Por fim, são apresentadas as fontes consultadas onde são relacionados todos os trabalhos, inclusive os eletrônicos lidos e não citados no texto, conforme modelo proposto pela NBR 6023/2000 (DUPAS, 2002). Seguem-se o Anexo I, em que constam todas as tabelas construídas a partir dos dados resultantes dos ensaios laboratoriais e o Anexo II, onde se encontra a relação das indústrias cerâmicas que forneceram os materiais da pesquisa.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre a história do surgimento das primeiras peças cerâmicas com uso de argila como matéria-prima para cerâmica vermelha; sobre as características da granulometria e da plasticidade, sem esquecer a importância da conformação, em especial, o processo de extrusão, que é um processo comum na fabricação dos produtos de cerâmica vermelha. Além disso, procedeu-se a uma revisão dos recentes estudos sobre os aditivos de processamento cerâmico, chamando a atenção para os defloculantes aquosos (orgânicos e inorgânicos), que têm apresentado bons resultados sem prejudicar a qualidade do produto final.

2.1- Cerâmica Vermelha: Breve Histórico

Segundo registros bíblicos, no livro de Gênesis capítulo 11, os descendentes de Noé fizeram tijolos queimados para construção da Torre de Babel (1700 a. C.) e, mais tarde, no livro de Êxodo, capítulo 5, relata-se que os israelitas, quando eram escravos dos egípcios, juntavam palhas que sobravam das colheitas para queimar tijolos (1250 a. C.).

NORTON (1973) fez uma tentativa para mostrar o progresso técnico do desenvolvimento histórico da cerâmica, desde os mais antigos tempos até o fim do século passado. Como muitas partes da história não são claras, não houve precisão nos seus relatos, embora tenha sido surpreendente sua contribuição em relação à descoberta desde objetos usados antigamente até os processos usados atualmente, em especial, a contribuição do começo da era cristã, em Roma e na China, onde encontraram peças cerâmicas. Observa-se também o grande desenvolvimento na Europa no século XVIII e, finalmente, o grande desenvolvimento no fim do século XX, quando a ciência e a engenharia foram aplicadas a essa arte antiga.

Segundo VERÇOZA (1975), a indústria cerâmica é uma das mais antigas do mundo, em virtude da facilidade de fabricação e abundância de matérias-primas – as

argilas. Já no período neolítico, o homem pré-histórico calafetava as cestas de vime com argila. Mais tarde verificou que podia dispensar o vime, e fez potes apenas de argila. Posteriormente, constatou-se que o calor endurecia essa argila, e surgiu a cerâmica propriamente dita, que foi largamente empregada para os mais diversos fins.

MASSOLA (1994) afirma que, por volta de 10.000 anos atrás, alguns grupos humanos que habitaram a terra já moldavam o barro. Durante milhares e milhares de anos, fizeram vasilhas e estatuetas simples que deixavam secar ao sol. Depois, descobriu-se que quando a argila moldada era queimada a altas temperaturas se transformava em outro material: tornava-se dura, resistente ao fogo e à água. Isto é, o material natural, o barro, podia ser transformado em um material artificial, a *cerâmica*. Esse estudo mostra ainda que a cerâmica nasceu quando as mulheres primitivas descobriram que se utilizassem uma vasilha de barro para “cozinhar”, numa fogueira, essa vasilha ficava muito mais resistente. Essa descoberta facilitou muito a vida das pessoas.

O registro mais antigo do tijolo foi encontrado nas escavações arqueológicas em Jericó, Oriente Médio, no período Neolítico inicial.

A unidade de alvenaria (tijolo) era uma peça grande em forma de pão, seca ao sol, pesando em torno de 15 kg. Nestas unidades de barro, conformados à mão, se encontram marcados os dedos do homem neolítico que as elaborou (ANICER, 2004).

2.2 – Argila para Cerâmica Vermelha

O termo argila, *lato sensu*, é empregado para designar um material inorgânico natural, de granulometria fina, com partículas de poucos micrômetros, que apresenta comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água. Do ponto de vista sedimentológico e granulométrico, a fração argila corresponde ao conjunto de partículas inferiores a 2 μm ou 4 μm , segundo as escalas de Atterberg e Wentworth, citados por MOTTA et al. (2004).

Como as argilas plásticas para cerâmica vermelha possuem composição mineralógica complexa, podendo também apresentar contaminação de esmectitas,

há possibilidade de comportamentos diferenciados dos modelos teóricos apresentados, tornando-se necessário um estudo detalhado de cada caso para que surpresas sejam evitadas (CAMPOS et al., 1999).

As argilas podem ser usadas na fabricação de materiais de construção civil, tais como, blocos maciços e furados, telhas, ladrilhos de piso, agregados leves, objetos de adorno (elementos vazados e outros), lajes cerâmicas e outros. A indústria oleira brasileira utiliza processos de moldagem manuais, por extrusão e por prensagem, conforme a natureza da argila, do produto cerâmico e do forno utilizado, bem como das condições econômicas locais (SOUZA SANTOS, 1992). Em geral compreendem aqueles materiais com coloração avermelhada, utilizados na construção civil e também utensílios de uso doméstico e de adorno. A cor vermelha que caracteriza esses produtos é resultante da oxidação de compostos de ferro presentes. A intensidade da cor varia não só em função da quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro que compõem o produto, como também da presença de outros minerais e argilominerais tais como: *ilita*, *camadas mistas*, *ilita-montmorilonita*, *clorita-montmorilonita* e *caulinita* e da atmosfera oxidante do tratamento térmico (ZANDONADI e JORDÃO, 2002).

Os tijolos e os blocos são produzidos tanto em cerâmica vermelha normal como em massa porosa, com o objetivo de aumentar a capacidade de isolamento térmico e acústico: as massas de cerâmica vermelha porosa são obtidas misturando à massa de argila, antes de sua conformação, materiais combustíveis finamente moídos que, durante o processo de sinterização, queimam completamente, deixando no interior da massa, pequenos vazios ou poros, não comunicantes entre si (CHIARA, BORRONI e CHIARA, 2000).

As argilas plásticas para cerâmica vermelha são argilas quaternárias recentes de elevada plasticidade, adequadas à conformação por extrusão. Quando conformadas, possuem resistência mecânica para as manipulações anteriores à queima, e quando queimadas à temperatura de 900°C, apresentam características físicas que atendem às solicitações da cerâmica vermelha (MENEZES et al., 2003).

2.3 – Preparação da Matéria-Prima e da Massa

As matérias-primas empregadas na fabricação de produtos cerâmicos são classificadas em *naturais*, que são as extraídas da natureza ou que foram submetidas a algum tratamento físico para eliminação de impurezas indesejáveis, ou seja, sem alterar a composição química e mineralógica dos principais componentes, e *compostas (artificiais, industrializadas, pré-fabricadas, sintéticas)* são as que individualmente ou em mistura foram submetidas a um tratamento térmico e as produzidas por processos químicos. As compostas geralmente são fornecidas prontas para uso, necessitando apenas, em alguns casos, de um ajuste de granulometria. A maioria das matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica tradicional é do tipo natural, encontrando-se em depósitos espalhados na crosta terrestre. Após a mineração, os materiais devem ser beneficiados, isto é, desagregados ou moídos, classificados de acordo com a granulometria, e às vezes purificados (ABC, 2004).

As matérias-primas que compõem a massa, sobretudo a massa composta, podem ser agrupadas em *plásticas e não-plásticas*. As plásticas conferem importantes características, tais como trabalhabilidade e resistência mecânica a cru. Já as matérias-primas não-plásticas têm maior atuação na fase do processamento térmico, favorecendo a secagem, diminuindo a retração das peças, controlando as transformações, as deformações e a sinterização (MOTTA et al., 2002).

Para MOTTA, ZANARDO e CABRAL JÚNIOR (2001), as matérias-primas minerais básicas são consumidas em grande volume e em diversidade na cerâmica tradicional, e vêm ganhando importância dentro do processo de aprimoramento da competitividade e da modernização tecnológica do setor, que se amplia para o abastecimento interno e se qualifica para a exportação.

As argilas ideais para a fabricação dos produtos de cerâmica vermelha devem, de modo geral, ser de fácil desagregação e permitir moldagem adequada; apresentar granulometria fina e distribuição granulométrica conveniente, tendo em vista o controle das dimensões finais do produto; possuir teor de matéria orgânica que possa conferir, juntamente com a granulometria, boa plasticidade e resistência mecânica suficiente para evitar deformações e permitir o manuseio das peças cruas;

apresentar baixo (ou nenhum) teor de carbonatos, sulfatos e sulfetos (ZANDONADI e JORDÃO, 2002).

Na preparação da massa se faz necessariamente a mistura e homogeneização das matérias-primas, visando juntar elementos de diferentes características para formar uma massa que apresente em cada ponto propriedades constantes. As condições de homogeneidade tornam-se melhores proporcionalmente à diminuição da granulometria, ou, seja, com uma moagem mais intensa, afirmam CHIARA, BORRONI e CHIARA (2000).

Independentemente do sistema utilizado, no processamento de produtos cerâmicos parte-se de uma mistura de matérias-primas, a qual sofre diversas transformações físico-químicas até adquirir as propriedades requeridas para o produto final.

A composição da massa deve ser em função das características do produto cerâmico que se deseja produzir e do processo de fabricação utilizado, e a qualidade do produto dependerá diretamente da mistura das matérias-primas empregadas e do processo de fabricação. De acordo com BARBA et al. (1997), em geral, uma massa é boa para a fabricação de produtos cerâmicos, quando atende uma série de condições, tais como: i) a relação de materiais plásticos (minerais argilosos) com não plásticos (quartzo, feldspato, chamota, etc) deve ser tal que confira à massa cerâmica a plasticidade necessária para realizar uma moldagem adequada e à peça conformada a resistência mecânica suficiente a verde e a seco; ii) se a preparação da massa se realiza por via úmida, deve ser facilmente defloculada e iii) a massa cerâmica deve possuir uma adequada composição química e mineralógica, de maneira que as transformações físico-químicas que ocorrem durante o processo de queima, confirmem ao produto acabado as características desejadas (coeficiente de dilatação, resistência mecânica, porosidade, etc).

Para MOTTA, ZANARDO e CABRAL JÚNIOR (2001), a formulação da massa visa, de forma empírica, uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, para propiciar trabalhabilidade e resistência mecânica na queima. Para isso, é feita geralmente através da mistura de uma argila "gorda" (pela alta plasticidade, pela granulometria fina e pela composição essencialmente de argilominerais); com uma argila "magra" (rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também

como material redutor de plasticidade). Adicionalmente à composição granulométrica, que reflete o conteúdo de argilominerais e quartzo, as argilas contêm também proporções variadas de matéria orgânica, material que contribui para maior plasticidade e resistência mecânica a cru das peças. Na seqüência do processo de fabricação, a massa é umidificada acima do limite de plasticidade (geralmente acima de 20%) e processada em misturadores e homogeneizadores rústicos, sendo conformada, a seguir, em extrusoras (marombas), quando adquire a sua forma final (blocos, lajes, lajotas, tubos) ou segue para prensagem (telhas) ou tornearia (vasos).

Para ZANDONADI e JORDÃO (2002), no processo de fabricação de cerâmica vermelha, geralmente é utilizada uma composição de duas ou mais matérias-primas, além de aditivos e água. Ao contrário do que ocorre em outros segmentos, em geral, a dosagem das matérias-primas precede sua preparação, pois, na verdade, a preparação da massa se inicia com a formação dos montes de argila a céu aberto nos pátios das indústrias. Após o sazonalamento, as matérias-primas são transportadas para o caixão alimentador, equipamento que dosa a quantidade necessária do material para dar entrada na linha de produção. A mistura dosada é conduzida aos desintegradores, onde os grandes blocos de argila são desintegrados e as pedras, quando existentes, são separadas. Nessa etapa, se o teor de umidade da mistura for muito elevado (varia de 16 a 25%), a eficácia de certos equipamentos será menor, como é o caso do desintegrador, que não desintegrará os blocos de argila, mas apenas os deformará.

O material desagregado é então transportado para o misturador, onde se inicia a homogeneização. Quando necessário, há adição de água nessa etapa. Em seguida, a mistura é transferida para o laminador, máquina que tem a função de ajustar a granulometria, completar a homogeneização e cortar a massa em lâminas.

Uma das etapas fundamentais do processo de fabricação de produtos cerâmicos é a dosagem das matérias-primas e dos aditivos, que deve seguir com rigor as formulações de massas, previamente estabelecidas. Os diferentes tipos de massas são preparados de acordo com a técnica a ser empregada para dar forma às peças. De modo geral, as massas podem ser classificadas em: suspensão, também chamada barbotina, para obtenção de peças em moldes de gesso ou de polímeros; massas secas ou semi-secas, na forma granulada, para obtenção de

peças por prensagem; massas plásticas, para obtenção de peças por extrusão, seguidas ou não de torneamento ou prensagem (ABC, 2004).

A composição granulométrica de massa cerâmica vermelha exerce papel fundamental no processamento e propriedades dos diversos tipos de produtos. Para cada produto, há uma distribuição granulométrica que parece ser a mais adequada, conforme explicitado a seguir.

2.4 - Análise Granulométrica

No processo de fabricação de produtos cerâmicos, são muito importantes o conhecimento e o controle da distribuição granulométrica de partículas das matérias-primas. Propriedades como plasticidade da massa cerâmica e viscosidade de suspensões dependem muito da distribuição granulométrica das partículas. Na sinterização do material cerâmico, a reação ou interação entre as partículas sólidas está relacionada com a área de contato, a qual, por sua vez, depende fundamentalmente da granulometria e da distribuição granulométrica das partículas (GOULART, 1994). Para esse autor, os objetivos da análise granulométrica de partículas são os seguintes:

- conhecer o tamanho e as quantidades das partículas de um material na forma de pó;
- conhecer melhor as propriedades dos materiais;
- conferir especificações dos materiais;
- manter as condições para o controle do processo de fabricação;
- interpretar o comportamento dos materiais.

Afirma ainda GOULART, tratando da distribuição granulométrica de partículas, que as matérias-primas cerâmicas são normalmente preparadas por processos de moagem, sendo que os formatos e os tamanhos das partículas resultantes deste processo são diferentes uns dos outros quando se considera o total das partículas. A caracterização dimensional destas partículas é muito difícil. Para efeito de cálculos, vários tipos de tamanhos equivalentes podem ser usados, tais como: diâmetro equivalente, calculado a partir do volume, da área ou da velocidade de sedimentação. Tamanho equivalente seria o tamanho de uma

partícula irregular que equivaleria ao tamanho de uma esfera. Na indústria cerâmica, o diâmetro equivalente a uma esfera que tem a mesma velocidade de sedimentação é o mais usado.

PRACIDELLI e MELCHIADES (1997) afirmam, em seus estudos sobre granulometria de massas para cerâmica vermelha, que a introdução de materiais não-plásticos altera a granulometria das massas, visto que suas partículas constituintes apresentam tamanhos consideravelmente maiores que as argilas, reduzindo assim a plasticidade da mistura. A variação da distribuição granulométrica e da plasticidade da massa provoca alterações no comportamento destas durante o processamento.

As frações granulométricas identificam três famílias de fragmentos, segundo CHIARA, BARRONI e CHIARA (2000):

- areia – superior a 20 μm ;
- silte – entre 20 e 2 μm ;
- argila – inferior 2 μm .

Também é interessante a fração mais grossa, superior a 63 μm , cuja presença pode chegar a 25%.

As três classes identificam campos de emprego, *teóricos*, na indústria de cerâmica vermelha para a produção de diferentes tipos de material: tanto maior a fração fina (argilosa) inferior a 2 μm , melhor é a qualidade do produto, traduzida pela maior resistência mecânica e menor absorção do corpo queimado. Mas estas matérias-primas requerem processos muito elaborados, e são de difícil manipulação.

Diversas propriedades dos materiais cerâmicos estão associadas ao empacotamento das partículas que os constituem. O estudo de empacotamento de partículas pode ser definido, segundo McGEARY (apud OLIVEIRA et al., 2000), como: *“O problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente”* (Figura 2.1), a seguir.

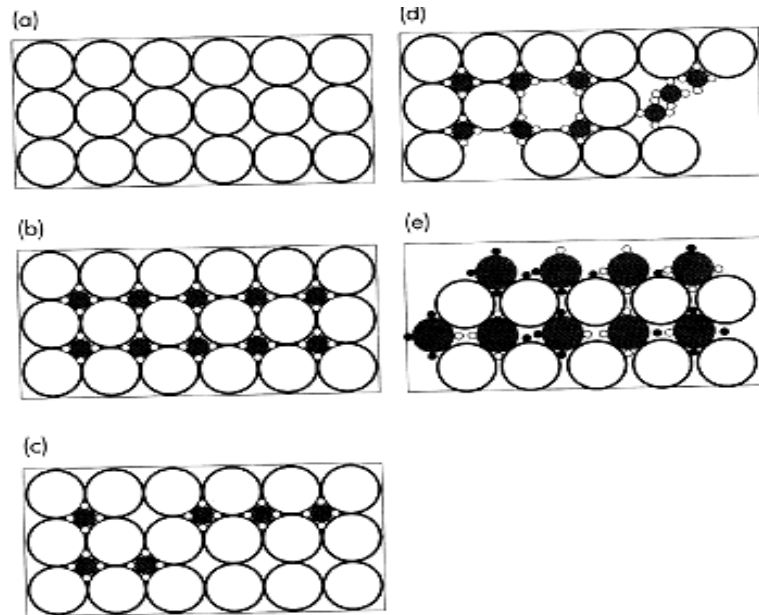


Figura 2.1: Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórica; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes e (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas (OLIVEIRA et al., 2000).

Estudos de caracterização de argilas vermelhas, realizados por PEREIRA et al. (2002) e por VIEIRA, SOUZA e MONTEIRO (2004), mostram a distribuição do tamanho de partículas, através do diagrama triaxial de Winkler, representado na Figura 2.2, a seguir. Esse diagrama apresenta a distribuição granulométrica, a composição mineralógica e as características físico-químicas das argilas, e permite que o sistema cerâmico seja comparado de acordo com três variações de tamanhos de partículas. Nessa comparação, a fração argila se torna um parâmetro característico da matéria-prima e fornece informações práticas em relação à afinidade com a água, à retração durante a secagem, à trabalhabilidade, à resistência mecânica e à porosidade da massa. Em consequência, se obtém informações relativas ao campo de aplicação.

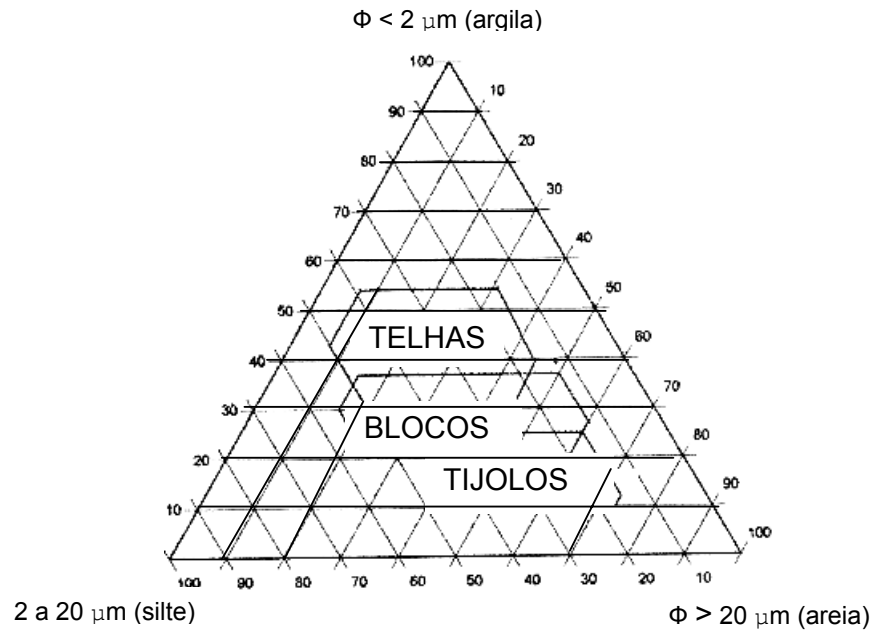


Figura 2.2: Diagrama de Winkler de distribuição granulométrica adaptado de ELIAS (apud PEREIRA et al., 2002).

Quando uma massa plástica apresenta 60% de fração argila, 20% de fração silte e 20% de fração areia, tem alta plasticidade e boa resistência à flexão após a secagem.

É de se esperar que algumas propriedades dos solos sejam alteradas com a manipulação mecânica durante o ensaio, como por exemplo, as características de plasticidade. Isto se deve principalmente à quebra das estruturas granulares com conseqüente aumento dos finos e da área específica que aumenta a adsorção de água e levaria a um aumento do índice de plasticidade (LIMA, 1983).

2.5 – Plasticidade

A plasticidade é a propriedade que um sistema tem de se deformar pela aplicação de uma força e de manter essa deformação quando a força aplicada é retirada. Se o sistema argila + água não fosse plástico, não seria possível fazer blocos por extrusão em marombas (extrusoras). A plasticidade em argilas é essencialmente resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais e da ação lubrificante da água entre as partículas anisométricas lamelares. Pode-se

admitir que a plasticidade se desenvolve quando a argila tem água suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais, com uma película de “água rígida” (não-líquida mas com um pouco de água “líquida”), isto é, não orientada, que age como meio lubrificante facilitando o deslizamento das placas umas sobre as outras quando uma tensão tangencial é aplicada. Essas duas águas, expressas percentualmente em relação à massa da argila seca, são o limite de plasticidade de Atterberg. Já a “água de plasticidade” é a quantidade de água necessária para tornar uma argila suficientemente plástica para ser moldada por um determinado método, geralmente por extrusão, (neste caso é também chamada água de extrusão). Qualquer que seja o tipo de moldagem (plástica, semi-seca, manual, colagem), quanto mais plástica é uma argila, maior é a água de plasticidade e também o limite de plasticidade. A água de plasticidade para moldagem por extrusão é igual ou superior ao limite de plasticidade da mesma argila, porém é inferior ao limite de liquidez, afirma SOUZA SANTOS (1992).

Os materiais plásticos, *as argilas*, manifestam um intervalo amplo onde se comportam como “*massa plástica*”. Outra manifestação mensurável da plasticidade é a resistência mecânica a cru. A resistência a cru tem relação com o teor de argila abaixo de 1 micron e a presença das outras dispersões coloidais, como por exemplo, o húmus vegetal preto de uma argila de várzea.

SINGER e SINGER (1963), em seus estudos sobre a plasticidade das argilas industriais, afirmam que a plasticidade em argilas é uma relação físico-química entre as partículas coloidais de argila e a água, e é afetada pelos seguintes fatores: *composição mineralógica, tamanho e distribuição de partícula, capacidade de troca de cátions, cátions presentes, pH e a tensão superficial da água*.

A plasticidade das argilas naturais depende da natureza da fração fina que difere do resto da argila. Esta fração contém a maioria dos minerais da argila, principalmente nas montmorilonitas e nas caulinitas, ambas com uma influência muito grande na plasticidade das argilas naturais.

O melhor pH para uma determinada argila é encontrado, testando-se a argila original, adicionando gradualmente ácido (ácido acético) ou álcali (carbonato de sódio), que leva à neutralidade, testando a trabalhabilidade em pequenos intervalos, e checado o pH da água fluvial, dada a sua possibilidade de variação a cada dia.

Uma argila com pH ótimo apresenta as seguintes melhorias durante a trabalhabilidade: *a argila tratada é mais plástica que a não-tratada; exige menos água para dar a plasticidade desejada, e menor potência para extrudar a massa, porque é mais plástica; a coluna de massa apresenta uma melhor estrutura física e tem uma tendência a laminar; o produto formado é mais perfeito com uma menor tendência a rachaduras e defeitos de canto; o produto seco tratado é menos permeável para molhar e freqüentemente pode ser colocado em água por um período de dez minutos sem desintegrar; a temperatura de queima normalmente é mais baixa porque a massa tem uma melhor distribuição de partículas; e os produtos queimados suportam maiores tensões compressivas transversais; baixa absorção de umidade e melhores cores, sendo o vermelho mais brilhante, a depender do teor de cálcio e ferro presentes.*

Cada argila exige uma quantidade de água diferente para a sua plasticidade máxima. SINGER e SINGER ainda resumiram dados publicados sobre vários tipos de argila, onde citam que a água de plasticidade da argila para blocos cerâmicos é na faixa de 13,20 a 40,70%, o que amplia as possibilidades de economia de água e energia.

GRIMSHAW (1964) afirma que as argilas diferem significativamente quanto à quantidade e à qualidade de sua plasticidade. As argilas “fortes” sofrem grandes deformações com aplicação de uma pequena tensão; já as “fracas” sofrem pequenas deformações e exigem uma maior tensão para provocar uma deformação apreciável. Existem algumas argilas “fortes” e “fracas” que requerem uma grande tensão para deformá-las e só mudam ligeiramente de forma, antes de serem rompidas. Portanto, quando se compara a plasticidade das argilas, é necessário incluir a deformação como também a tensão necessária para produzir tal deformação.

As argilas “fortes”, cuja plasticidade se deve ao uso de óleo ou de materiais adicionados, têm sua plasticidade afetada principalmente pelos seguintes fatores relacionados com as partículas sólidas: *o efeito de água ou de outro meio fluido nas partículas sólidas e fenômenos coloidais entre elas; o tamanho e a composição das partículas sólidas; a distribuição de tamanho dessas partículas; a forma e a estrutura interna das partículas sólidas; a agregação, a área de superfície e a atração intermolecular das partículas sólidas; a presença de outros materiais que podem*

influenciar nas propriedades das partículas; a orientação das partículas na massa e, finalmente, a história prévia do material argiloso.

CAMPOS et al. (1999), em seus estudos sobre as características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha, definem que as características de plasticidade dos solos são tradicionalmente determinadas pelo método de Casagrande e são constituídas pelo limite de liquidez (LL), pelo limite de plasticidade (LP) e pelo índice de plasticidade (IP), que são também denominados de índices de Atterberg, onde o limite de liquidez é o teor de água expresso em porcentagem de argila seca, acima do qual a massa flui como um líquido, quando agitada ligeiramente; o limite de plasticidade é o teor de água, expresso em porcentagem de argila seca de uma massa plástica, acima do qual a massa pode ser moldada na forma de cilindros medindo de 3 a 4 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento, as argilas que não formam esses cilindros com qualquer teor de água são consideradas não-plásticas, e o índice de plasticidade é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

Na prática ceramista, RIBEIRO, FERREIRA e LABRINCHA (2003) definem dois diferentes tipos de plasticidade: *a boa e a má*. Se a massa se adapta perfeitamente a um processo específico de conformação, define-se a *plasticidade* como *boa*; por outro lado, se a massa, ao ser conformada, origina defeitos no produto ou demonstra dificuldades na conformação, a *plasticidade* é considerada como *má*. Uma plasticidade inadequada causa empenamentos e trincas que comprometem a qualidade do produto final, provocam perdas e desperdícios durante o processamento das peças, podendo causar danos à maromba. O que é confirmado por MENEZES et al. (2003), onde afirmam que para essa argila de elevada plasticidade pode ser necessária adição de compostos de menor plasticidade ou até mesmo de materiais não-plásticos de forma a obter-se uma plasticidade ao processamento. Pois plasticidade inadequada causa defeitos visíveis comprometendo a qualidade do produto final, além de provocar uma série de perdas e desperdícios durante o processamento dos produtos, podendo causar danos às extrusoras.

Para RIBEIRO et al. (2004), ao se estudar a plasticidade das massas plásticas cerâmicas, existem vários métodos de determinação, os quais podem ser divididos em dois grupos conforme determinem uma propriedade relacionada com a

plasticidade (métodos indiretos) ou uma abordagem mais direta (métodos diretos). Como é possível verificar pela classificação dos diferentes testes, a medição da plasticidade até pode ser uma tarefa simples mas a interpretação dos resultados já é uma tarefa mais complicada e a comparação de resultados obtidos por diferentes métodos requer extremos cuidados, visto não ser possível uma comparação direta de valores. Os métodos indiretos incluem medições da: proporção de água necessária para desenvolver na massa uma determinada consistência; proporção de matéria coloidal presente na argila; viscosidade da massa; penetrabilidade da massa; resistência à flexão e retração verde-seco. E os métodos diretos podem consistir em: verificação da aderência da massa; métodos de extrusão; métodos de extensão; métodos de compressão e métodos de torção.

E não se deve deixar de mencionar a importância do método das curvas de *tensão x deformação*, o qual consiste em um corpo de prova cilíndrico previamente moldado, com 3,3 cm de diâmetro e 4,3 cm de altura. Esse corpo é sujeito a um teste de compressão, a velocidade constante, e até um máximo de deformação de cerca de 70% (ou até se atingir o limite da célula de carga). Teoricamente as curvas tensão x deformação de uma massa plástica são do tipo apresentado na Figura 2.3.

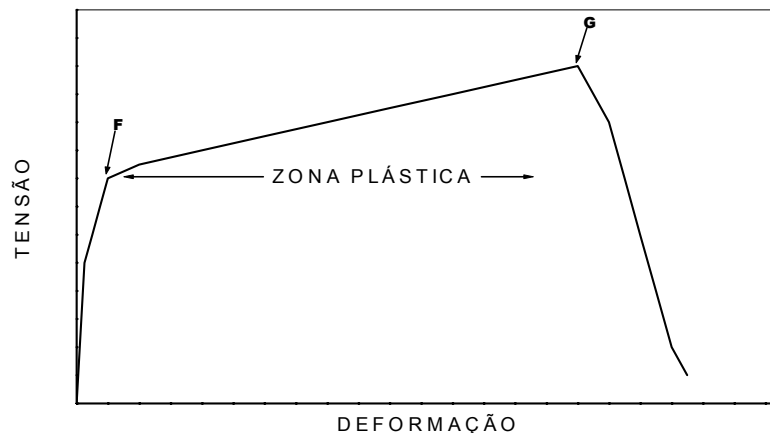


Figura 2.3: Curva tensão x deformação teórica de uma massa plástica cerâmica (adaptado de RIBEIRO, FERREIRA e LABRINCHA, 2003).

Na Figura 2.3, tem-se até o ponto F (denominado de *ponto de fluência*) o material com um comportamento elástico. A partir desse ponto, o aumento contínuo do movimento de compressão dá origem a um comportamento plástico (zona

plástica do material), em que a deformação do corpo de prova ocorre para valores de tensão aproximadamente constantes (zonas plásticas mais extensas indicam massas mais plásticas). Finalmente, quando se atinge o ponto G (*ponto de máxima deformação*), a ruptura do corpo de prova tem início e a tensão cai rapidamente, afirmam RIBEIRO, FERREIRA e LABRINCHA (2003).

Um outro ensaio bastante usado pela maioria dos laboratórios cerâmicos para determinação das características de plasticidade, é o tradicional *método de Casagrande*. No entanto, a sua validade tem sido questionada, por se tratar de um método que consiste essencialmente em um ensaio dinâmico de cisalhamento, não proporcionando base uniforme de comparação para solos finos, os quais apresentam reações diferenciadas quando submetidos a ensaio de vibração. SILVEIRA (1984) relaciona como as principais desvantagens desse método, o seguinte:

- dificuldade de se fazer a clássica ranhura em alguns solos, particularmente nos arenosos;
- tendência dos solos de baixa plasticidade a deslizar na concha do aparelho antes de fluir por plasticidade;
- tendência de alguns solos de baixa plasticidade de se liquefazerem com vibração, antes de fluir por plasticidade.

Por esses problemas, e aliados a certos fatores inerentes ao próprio ensaio, diversas pesquisas têm se desenvolvido com a finalidade de melhor adequar o ensaio ou mesmo propor outro método.

Em virtude da principal desvantagem do uso do aparelho de Casagrande residir no fato de que o limite de liquidez (LL) do solo é determinado por meio de um ensaio de cisalhamento dinâmico, é de se esperar que deixará de existir esta desvantagem, se o ensaio for executado em aparelho cujo cisalhamento obtido seja do tipo estático. Deste modo, o método do *cone de penetração* apresenta-se como um método alternativo, cujo ensaio consiste, basicamente, em se medir o quanto um cone padronizado penetra verticalmente em uma amostra previamente preparada, sob condições especificadas de peso e ângulo de penetração. Com isso, o problema fica reduzido a se encontrar uma relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e o teor de umidade correspondente ao LL.

Em geral, uma massa mais plástica aceita mais água até fluir, isto é, uma argila mais plástica precisa de mais água, para desenvolver a plasticidade, do que outra menos plástica.

Segundo CAPUTO (1994), para os solos em cuja textura haja certa porcentagem de fração fina, não basta a granulometria para caracterizá-los, pois suas propriedades plásticas dependem do teor de umidade, além da forma das partículas e da sua composição química e mineralógica. O índice de Atterberg que é calculado pela equação (1), define a zona em que o solo se acha no estado plástico, e por ser máximo para as argilas e nulos para as areias, fornece um critério para se ajuizar o caráter argiloso de um solo. Assim, quanto maior o índice de plasticidade, mais plástico será o solo.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

onde:

IP = índice de plasticidade

LL = limite de liquidez

LP = limite de plasticidade

Sabe-se que as argilas são tanto mais compressíveis quanto maior for o IP. Os solos argilosos poderão ser classificados em:

- fracamente plásticos..... $1 < IP < 7$
- medianamente plásticos..... $7 < IP < 15$
- altamente plásticos..... $IP > 15$

Segundo CAPUTO, sendo a umidade (h) de um solo argiloso muito elevada, este se apresenta como um fluido denso e em *estado líquido*. À medida que evapora a água, ele se endurece e, para certo $h = LL$, perde sua capacidade de fluir, porém, pode ser moldado facilmente e conservar sua forma. O material encontra-se, agora, no *estado plástico*. Continuando a perder umidade, o estado plástico desaparece até que, para $h = LP$, o solo se desmancha ao ser trabalhado. Este é o estado *semi-sólido*. A continuar a secagem, ocorre a passagem gradual para o estado sólido. O limite entre os dois estados é um teor de umidade $h = LC$ (*limite de contração*), que foi classificado por Atterberg como os teores de umidade limite entre os vários estados. A Figura 2.4, a seguir, ilustra bem tal fenômeno físico.

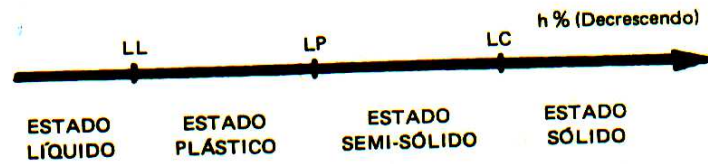


Figura 2.4: Esquema dos estados de consistência e suas fronteiras (CAPUTO, 1994).

Ainda em seu estudo sobre a plasticidade dos solos finos, CAPUTO (1994) afirma que as características e propriedades físicas mais importantes deste tipo de solo podem ser divididas em oito grupos, a saber: *argilas inorgânicas de alta, média e baixa plasticidade; solos siltosos inorgânicos de alta, média e baixa compressibilidade; argilas orgânicas e siltes orgânicos*. A classificação de um solo, dentro de um destes grupos, pode ser feita de maneira simples, por meio de um gráfico de plasticidade, conforme a Figura 2.5, que representa um modelo de carta de plasticidade proposto por Casagrande.

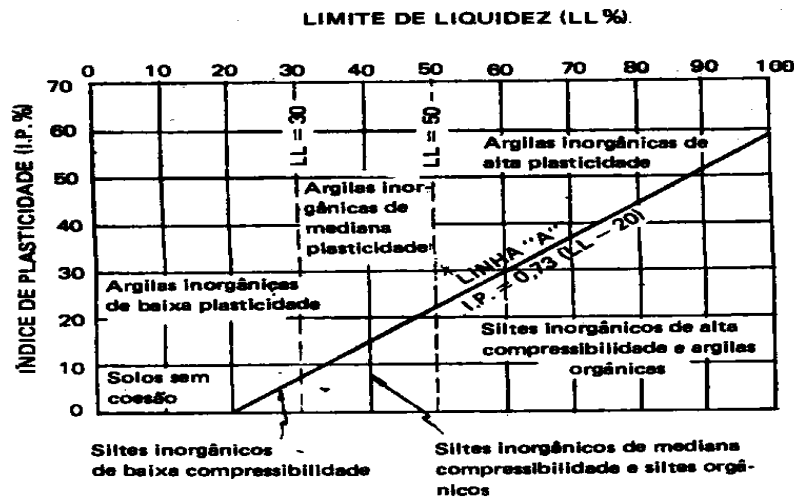


Figura 2.5: Modelo de carta de plasticidade proposto por Casagrande, (CAPUTO, 1994).

O limite de plasticidade (LP) tem seu valor influenciado pelos argilo-minerais presentes na composição da argila. Para SILVEIRA (1984), o valor do LP decresce para os argilo-minerais, na seguinte ordem – montmorilonita, haloisita, caulinita -; e a variação nos valores do limite de liquidez (LL) para um grupo de argilominerais é bem maior do que a variação para valores de LP. Os valores de LL, para estes argilominerais decrescem nesta ordem: montmorilonita com sódio, cálcio, magnésio e potássio, illita, caulinita mal cristalizada, haloisita e caulinita bem cristalizada. Assim,

as variações que ocorrem nos valores dos índices de Atterberg são conseqüências da remoção dos argilominerais, os quais estão sob a forma de cachos. Estes são dispersados por vigorosos trabalhos mecânicos, que extraem os óxidos de ferro resultando assim aumento na plasticidade. Com a manipulação da amostra durante os ensaios, altera-se a estrutura encadeada dos argilominerais. Com a conseqüente modificação em suas superfícies específicas, é de se esperar que os índices de Atterberg tenham também seus valores alterados, logo há um aumento no limite de liquidez e limite de plasticidade.

2.6 - Conformação

Os produtos cerâmicos obtidos por meio da aglomeração de partículas podem ser conformados através de grande variedade de métodos, no estado seco, plástico ou líquido. Na prática, predominam os processos de conformação a frio, mas os processos de conformação a quente também são bastante usados. Os principais métodos de conformação de produtos de cerâmica vermelha, geralmente usados, são a *prensagem* e a *extrusão*.

2.6.1 – Processo de prensagem

A prensagem é a operação de conformação baseada na compactação de um pó granulado (massa) contido no interior de uma matriz rígida (molde), através da aplicação de pressão. Tem por finalidade conformar a peça, dando-lhe resistência mecânica suficiente para suportar o transporte até o secador.

As características da composição que influem em maior medida sobre seu comportamento na etapa de prensagem, assim como sobre as propriedades da peça conformada (porosidade e microestrutura), são as seguintes: *distribuição do tamanho e forma dos aglomerados; tipo de composição e distribuição do tamanho de partículas*, segundo GARCÍA et al. (1990).

A prensagem das matérias-primas, sob a forma de partículas se dá no estado seco, semi-seco ou úmido, de uma matriz que confere a forma aos produtos (SMITH,

1998). Na prensagem a seco, a massa, que possui aproximadamente 6% de umidade, é submetida a altas pressões para assegurar a ruptura dos grânulos e compactação uniforme. Devido ao baixo teor de umidade na massa, uma alta precisão dimensional é alcançada nos produtos quando se utiliza este processo (RICHERSON, 1992).

A conformação por prensagem é muito utilizada pela indústria cerâmica devido à sua elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas, sem contração de secagem e com baixa tolerância dimensional. Há duas modalidades de prensagem: *a uniaxial e a isostática. Limitamo-nos, neste estudo, à modalidade uniaxial por ser a mais utilizada pelas indústrias de cerâmica vermelha.*

A prensagem uniaxial é a técnica de conformação de peças mais empregada no processamento de materiais cerâmicos. Consiste na compactação de uma massa aglomerada contida em uma cavidade rígida, mediante a aplicação de pressão em apenas uma direção axial, através de um ou vários punções rígidos. A cavidade rígida é composta pela base móvel denominada punção inferior e pelas paredes, que podem ser móveis ou fixas, chamadas de matriz do molde. As diferentes técnicas de prensagem se diferenciam pela movimentação destes elementos responsáveis pela aplicação da pressão. Este método é limitado a formas que são relativamente simples; porém, as taxas de produção são altas e o processo é barato (CALLISTER, 2002).

Existem diversos processos para dar forma às peças cerâmicas, e a seleção de um deles depende fundamentalmente de fatores econômicos, da geometria e das características do produto. Dados os interesses do presente estudo, explicitaremos com mais detalhes o *processo de extrusão*.

2.6.2 – Processo de extrusão

A extrusão é um método de conformação que tem sido extensivamente utilizado para a fabricação de produtos cerâmicos. O processo consiste em forçar uma mistura plástica, através do orifício de uma matriz rígida. O comportamento da massa plástica, durante a extrusão, é influenciado pelas características do pó e pelo

teor de umidade da massa. O comportamento plástico é resultante do uso de argilas, ligantes orgânicos poliméricos ou da mistura dos dois tipos. Afirmam REED (1995) que esse método de conformação pode ser utilizado para a produção de peças de dimensões grandes e pequenas.

CHIARA, BORRONI e CHIARA (2000) afirmam que a conformação por extrusão é a técnica mais utilizada no campo de cerâmica vermelha. Pode ser obtida com massa possuindo um percentual de umidade em relação ao peso seco que pode variar entre 20 e 26%.

A *conformação com massa mole* é um sistema de conformação que permite essencialmente produzir tijolos maciços ou com pequeno baixo-relevo central, e suas peças acessórias. O percentual de água necessário a este tipo de conformação é em torno dos 30 a 36% do peso total da massa.

Existem instalações capazes de produzir até 30.00 peças/hora. Geralmente são as mesmas utilizadas para extrusão normal, exceto pela adição de misturadores de eixo único que, trabalhando de modo intermitente, têm a função específica de preparar massas com alto teor de umidade.

Para NAVARRO (2001), a moldagem por extrusão é um processo em que o material é forçado contra uma matriz por meio de um eixo sem fim, onde é possível produzir artigos com áreas de seção transversal constante (que pode ser maciça ou oca) e uniforme ao longo do comprimento.

A extrusão pode ser uma etapa intermediária do processo de conformação, seguindo-se após corte da coluna extrudada, a prensagem, como é o caso para a maioria das telhas, ou o torneamento.

O material, alimentado na forma de grãos, é plastificado pela ação da rosca com ajuda de líquidos. Pelo movimento da rosca, o material é transportado até a matriz. Ao passar pela matriz, assume a sua forma interna e é expelido da máquina quando o produto cerâmico é cortado em tamanhos pré-determinados, devendo passar por processos de secagem e queima, para obter condições de uso.

São conhecidos três sistemas diferentes para a extrusão. São eles:

Pistão, que tem como característica, grande uniformidade de velocidade e pressão em toda a seção de saída. Porém, seu fluxo não é contínuo, impossibilitando a utilização de vácuo.

Cilindros, sistema que, apesar de apresentar fluxo contínuo de alimentação e poder com isso utilizar-se do sistema de desaeração (vácuo), apresenta diferenças de velocidade e pressão na seção de saída e ainda não permite uma boa homogeneização da mistura.

Hélices, sistema que permite boa homogeneização, utilização de sistema de vácuo, fluxo contínuo e boa distribuição de pressão na saída do material (POLOCERÂMICO, 2002).

Neste estudo, limitamo-nos ao sistema de extrusão por hélices, por ser o mais utilizado pelas indústrias de cerâmica vermelha.

Segundo NIZZOLA (2001), no processo de extrusão existem parâmetros que influem diretamente no processo produtivo e que podem ser enumerados, como: 1) qualidade da argila e sua granulometria; 2) tipo de equipamento de preparação empregado; 3) porcentagem de água de extrusão; 4) temperatura da argila; 5) pressão de extrusão; 6) secção de saída do molde (ou facilidade de saída); 7) velocidade de extrusão (ou produção); 8) diâmetro da hélice de extrusão; 9) passo da hélice de extrusão; 10) rotação da hélice de extrusão; 11) nível de polimento superficial da hélice de extrusão e 12) rendimento da hélice de extrusão.

Com base nesses parâmetros estabelecem-se alguns princípios e normas de extrusão devidamente comparadas, na prática, por diferentes pesquisadores em suas experimentações. Tais princípios podem ser enumerados: 1) granulometria fina da argila solicita mais água de extrusão; 2) porcentagem de água de mistura menor, aumenta a pressão de extrusão e a potência necessária; 3) velocidade de extrusão (ou maior produção) aumenta a pressão de extrusão e a potência necessária; 4) menor secção de saída do molde (ou boquilha) aumenta a pressão de extrusão e a potência necessária; 5) pressão de extrusão maior, diminui a eficiência da hélice; 6) pressão de extrusão e potência necessária diminuem quanto maior for a temperatura de argila; 7) produção volumétrica será maior se a secção de saída aumentar; 8) eficiência da hélice diminui ao se aumentar sua rotação; 9) rotação da hélice alta, aumentará sua produção até se chegar à velocidade crítica que uma vez ultrapassada, fará com que a produção diminua. Chegando-se a dobrar a velocidade crítica o rendimento da hélice tenderá a anular, ou seja, observar-se-á que hélice e argila giram juntas sem que haja produção no equipamento; 10) velocidade crítica é variável e depende da qualidade da argila, da pressão mínima necessária para

extrudá-la do projeto da hélice, das camisas do corpo-hélice, entre outras, mas cresce ao se aumentar a porcentagem de água de mistura; 11) rotação da hélice maior, aumenta a produção e, necessariamente, a potência, diminuindo a eficiência da hélice e, portanto, o rendimento energético do conjunto; 12) polimento superficial da hélice e rugosidade do corpo-hélice maiores aumentam o rendimento da hélice.

No processo de conformação por extrusão são extremamente importantes as seguintes etapas (RICHERSON apud SANTANA, 2002): formulação da massa; mistura; extrusão; secagem; densificação e controle de qualidade. E como em outros processos de conformação, o tamanho, a forma e o grau de aglomeração das partículas devem ser considerados.

Segundo RIBEIRO, FERREIRA e LABRINCHA (2003), a primeira condição para se conseguir bons resultados na extrusão de produtos cerâmicos é ter uma massa para extrusão que apresente as menores variações possíveis em termos de *composição; grau de moagem e teor de umidade*. Esses autores citam que nas massas com elevados teores de umidade, próximos ao limite de liquidez (LL), facilmente ocorre o deslizamento entre partículas, a massa argilosa tenderá a aderir-se às hélices da extrusora e fluir pelo centro da fieira com maior velocidade. Algo semelhante ocorrerá, se diminuir o teor de umidade e trabalhar abaixo da zona de máxima plasticidade.

A Figura 2.6, a seguir, mostra, esquematicamente, as forças de compressão no interior de uma extrusora, onde há dois picos em zonas diferentes. O primeiro, de baixa intensidade, surge logo no fim da primeira hélice junto ao cortador interno, na entrada da câmara de vácuo, onde surge a primeira restrição à passagem da massa. O outro pico, com início na zona de pré-compressão e máximo à entrada da sobre boca, tem maior intensidade e define a zona onde se desenvolvem as forças de compressão do material e onde se desenvolvem desgastes elevados dos componentes da extrusora.

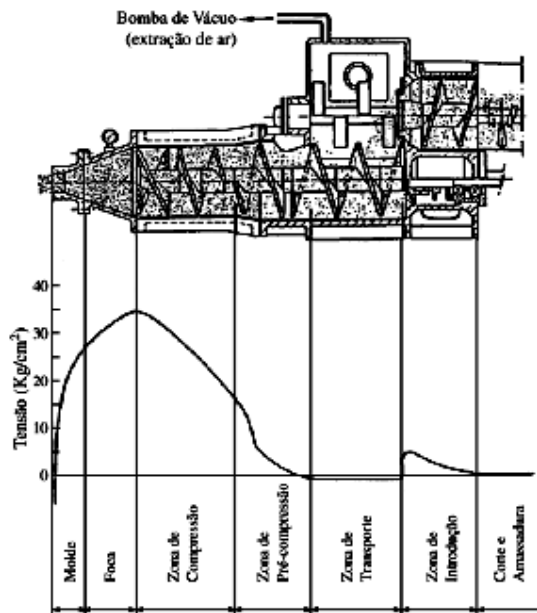


Figura 2.6: Corte de uma extrusora de dupla hélice, com o respectivo gráfico de pressões exercidas no seu interior e a identificação das diferentes zonas, (RIBEIRO, FERREIRA e LABRINCHA, 2003).

De um modo geral, pode-se afirmar que massas de alta plasticidade deslizam melhor sobre a superfície da hélice, traduzindo-se numa maior pressão e, conseqüentemente, numa melhor homogeneização e compactação da massa argilosa na zona de saída (boquilha).

De acordo com ONODA e HENCH (1978), para a obtenção de bons rendimentos e níveis de qualidade na extrusão de produtos cerâmicos, é necessário ficar atento à preparação da massa, controlando adequadamente as matérias-primas e o teor de umidade, com o intuito de se obter a plasticidade mais adequada. É ainda necessário adequar a velocidade de extrusão e o molde ao tipo de material extrudado. O revestimento das paredes internas da extrusora deverá ser rugoso e a hélice bem polida, para que o avanço da massa ocorra corretamente.

SANTANA (2002) afirma que se pode melhorar a qualidade dos produtos cerâmicos extrudados através do processamento visco-plástico (PVP), que é uma técnica desenvolvida para eliminar boa parte dos defeitos microestruturais, como a aglomeração, que ocorre espontaneamente em pós cerâmicos finos.

Durante o processo de conformação por extrusão é comum a ocorrência de defeitos. Destacamos aqui a ocorrência do *coração negro*, mancha negra e cinza que permanece (podendo ser vista ao longo da seção transversal das peças) no interior dos produtos, após processo de queima. Neste caso, não ocorre total

oxidação da matéria orgânica em consequência da combustão de substâncias orgânicas em pequenas quantidades. A espessura e o teor de substâncias orgânicas são também causas muito importante da formação de coração negro, que não representa um defeito estético, a menos que apareça na superfície. A incorporação de aditivos (amônia, por exemplo) diminui o efeito. A adição de substâncias não-plásticas permite freqüentemente eliminar totalmente o coração negro (OLIVEIRA et al., s/d).

No processamento de materiais cerâmicos é comum a prática de adicionar água para obter massas plásticas e depois secá-las, mas se o teor de água puder ser reduzido sem prejuízo da plasticidade e trabalhabilidade das massas cerâmicas e das propriedades cerâmicas das peças úmidas, secas e após a queima, haverá uma economia apreciável do combustível usado na secagem (RAWET e SOUZA SANTOS, 1980).

Estudos anteriores (RODRIGUES, 1978 e SALOMÃO, 1979) visam obter economia de combustível na secagem de peças cerâmicas, por meio da incorporação de aditivos químicos.

2.7 – Uso de Aditivos em Processamentos Cerâmicos

Com a evolução na tecnologia de fabricação dos produtos cerâmicos, surgiu uma variedade de aditivos químicos que auxiliam desde o processo de moagem até etapas posteriores à queima.

Os aditivos usados em processamento de massas cerâmicas podem ser *defloculante, plastificante, surfactante e líquidos*, segundo REED, (1995).

Para SMITH (1998) a maioria dos produtos cerâmicos é fabricada por meio da aglomeração de partículas. As matérias-primas para estes produtos variam com as propriedades exigidas para a peça cerâmica final. As partículas e aditivos de processamentos tais como ligantes e lubrificantes podem ser misturados úmidos ou secos.

CHIARA, BORRONI e CHIARA (2000) afirmam que no processamento de materiais cerâmicos diferentes aditivos devem ser incorporados à mistura para produzir um comportamento de fluxo e propriedades adequadas para a

conformação. O emprego de aditivos facilita o uso da massa e torna o produto comercial e economicamente viável.

Não é muito freqüente o uso de argilas provenientes de depósitos com características diferentes. Entretanto, são utilizados aditivos misturados à argila-base para reduzir os problemas de produção e/ou incrementar as quantidades de produto acabado.

Na indústria de cerâmica vermelha empregam-se corretivos misturados à argila base para reduzir os problemas de processamento, melhorando a qualidade do produto acabado. Tratam-se de emagrecedores, que são materiais naturais, como as areias, as quais são utilizadas com argilas excessivamente plásticas, com grandes problemas de secagem e queima. A fim de evitar a formação de fissuras e para diminuir os ciclos de produção, particularmente quando se refere à secagem, se faz necessário o uso dos seguintes emagrecedores:

- areias silicosas e, portanto, não carbonadas;
- areias feldspáticas;
- areias lodosas ou lodo arenoso;
- rochas carbonadas moídas (bassaltos, granito, etc.) que podem derivar de outros processos de manufatura, como o moído de cerâmica vermelha (chamote) e as cinzas volantes.

Ainda se utilizam materiais tais como a serragem, o isopor, etc., que além de terem efeito emagrecedor, acrescentam uma contribuição energética à queima, tornam mais leve o material e aumentam suas capacidades isolantes acústica e térmica.

O estudo da plasticidade de argilas tratadas com aditivos tem como objetivo reduzir os valores do limite de plasticidade dessas argilas, procurando manter a mesma extrudabilidade da argila original. A variação, ou seja, a diferença entre o valor do limite de plasticidade da argila original e o seu valor para a argila mais aditivo, se dá tanto no sentido de redução como no de aumento do limite de plasticidade.

É desejável que se mantenham ou diminuam os valores das propriedades físico-mecânicas tais como: *massa específica aparente, absorção de água e*

porosidade aparente da massa plástica, enquanto que para a tensão de ruptura se deseja manter ou aumentar seus valores (SALOMÃO, 1975).

No tratamento da massa plástica com diferentes aditivos visando a redução do limite de plasticidade, deseja-se, no processo de fabricação de blocos cerâmicos, a extrusão do material com uma quantidade menor de água. Essa redução da quantidade de água acarreta um menor gasto de energia para a secagem da massa extrudada, tornando o processo mais econômico. Enfim, é importante tomar as devidas precauções para a escolha de um aditivo que diminua o LP, mas que não prejudique a qualidade do bloco cerâmico produzido.

Para AMARANTE JÚNIOR e PRACIDELLI (1979), as argilas, quando tratadas corretamente com alguns sais inorgânicos alcalinos, demonstram marcantes melhoramentos nas suas propriedades para o uso industrial. Esses autores usaram o carbonato de sódio (Na_2CO_3), nas proporções 0,05; 0,30 e 0,60%, o que resultou em melhores condições de extrusão, porém com diminuição da plasticidade.

CAMPOS et al. (1998), visando estudar as características de plasticidade em massa plástica usada em cerâmica vermelha, usou como floculante o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e como defloculante o carbonato de sódio (Na_2CO_3). Estes aditivos foram utilizados na proporção de 0,50; 100; 150 e 200 meq/100g de argila seca, o que resultou em influência marcante nas características de plasticidade.

Nos últimos anos, tem-se estudado as massas na indústria cerâmica visando melhorar o rendimento da moagem, reduzir a água de moagem, aumentar o rendimento da atomização e melhorar a resistência a cru. Tais estudos passam pelo desenvolvimento de massa, pela pesquisa de novos materiais argilosos, com a busca de floculantes e defloculantes e a atuação destes no sistema argila + água. SILVA (1996) adicionou progressivamente a uma suspensão de argila em água o silicato de sódio (Na_2SiO_3), como defloculante. Logo observou que tal adição modificou a argila para argila sódica, aumentando conseqüentemente a repulsão entre as partículas e diminuindo a viscosidade da suspensão, o que resultou na redução do potencial zeta e no aumento da viscosidade da suspensão.

Segundo esse autor, os defloculantes mais utilizados em materiais argilosos são os seguintes: *silicato de sódio; tripolifosfato de sódio; hexametáfosfato de sódio; poliácrilato de sódio e refrix*, estes são defloculantes especiais muito utilizados nas indústrias cerâmicas, à base de polisilicato de sódio, polifosfatos e protetores

coloidais. Trata-se de defloculantes especiais à base de polisilicatos de sódio, polifosfatos e protetores coloidais. O autor chama atenção para o grande uso do *silicato de sódio* como o defloculante mais utilizado na indústria cerâmica, por dois motivos:

- é um produto de custo baixo em relação a outros defloculantes;
- apresenta um bom poder defloculante, devido ao fato de a sílica coloidal ser um potente “colóide protetor”.

Para REED (1995) os aditivos mais freqüentemente utilizados no processamento de massas cerâmicas são os relacionados a seguir.

2.8.1- Ligantes

Os ligantes são aditivos usados para melhorar a resistência do produto conformado (*resistência a verde*) para permitir o manuseio antes da densificação pela queima.

Os ligantes também podem ser do tipo coloidal e molecular, conforme a Tabela 2.1, que apresenta diversos tipos de ligantes.

TABELA 2.1 – Tipos de ligantes (REED, 1995).

TIPO COLOIDAL	
ORGÂNICO	INORGÂNICO
Celulose microcristalina	Argilas (caulim, ball clay, bentonita)
TIPO MOLECULAR	
ORGÂNICO	INORGÂNICO
Vinílico (PVA, PMMA)	Silicatos solúveis (Na)
Celulósico (MC, HEC, CMC)	Fosfatos solúveis (Na, K)
Glicóis (PEG)	Aluminatos solúveis (Na)
Ceras (parafinas)	

Floculantes ou ligantes são geralmente moléculas poliméricas e partículas coloidais coaguladas que são adsorvidas e ligadas entre partículas cerâmicas, produzindo uma floculação interpartícula, ou seja, formando uma ponte de ligação entre elas.

Um flocculante adsorvido pode melhorar muito as propriedades do sistema, como:

- molhamento de partículas (agente de molhamento);
- aumento significativo da viscosidade aparente;
- retarda o grau de assentamento das partículas (agente de suspensão);
- funciona como agente reológico, como por exemplo, altera a dependência da viscosidade aparente com a temperatura ou taxa de fluxo.

Quando adicionado em sistemas mais condensados, como em grânulos para prensagem e corpos extrudados, o flocculante pode ter diferentes ações.

Muitas vezes um sistema trabalhável é produzido com o uso de apenas um aditivo flocculante, mas em alguns casos, dois ou mais diferentes tipos são usados. No processamento cerâmico, esses aditivos são chamados como ligantes; denominação mais comum do que flocculante.

A decomposição dos ligantes durante a queima comumente produz gás e poros, os quais devem ser eliminados durante a etapa de sinterização para obter uma cerâmica densa. Por razões técnicas e econômicas, o ligante deve ser convenientemente disperso e homogeneizado no sistema.

Os ligantes moleculares orgânicos podem ser introduzidos como solução aquosa ou não aquosa e emulsões líquidas. Alguns tipos desses ligantes como o álcool polivinílico e tipos de celulose, são adquiridos na forma de pós e devem ser dissolvidos em água, antes de misturados à matéria prima. Os ligantes inorgânicos são comumente introduzidos ao sistema como solução aquosa ou dispersão.

Alguns ligantes como o carboximetilcelulose (CMC) que contém grupos ionizáveis, podem mudar o comportamento de adsorção e o grau de flocculação/deflocculação, sendo usado em barbotinas e vidrados. Frequentemente aumenta a viscosidade do sistema e controla as propriedades de colagem nas massas cerâmicas tradicionais.

A dissolução de um ligante depende das ligações entre as moléculas polares e apolares. Alguns ligantes têm suas superfícies tratadas para melhorar a dissolução. Assim, ligantes com grupos laterais polares atraem moléculas de água e podem tornar-se consideravelmente hidratados, já ligantes com grupos laterais apolares são solúveis em solventes apolares.

As argilas contendo o argilomineral montmorilonita são ligantes, em virtude de sua elevada área específica, tendem a coagular naturalmente. Já os ligantes moleculares são moléculas poliméricas com peso molecular variando de baixo para alto que adsorvem na superfície das partículas, ligando-as entre si. A funcionalidade de uma molécula polimérica pode ser não-iônica, aniônica ou catiônica.

As argilas, quando tratadas corretamente com alguns sais inorgânicos alcalinos, demonstram marcantes variações nas suas propriedades reológicas para uso industrial. Tornam-se mais plásticas, apresentam menor consumo de energia elétrica para serem extrudadas, menor teor de água para plastificação, após secagem; apresentam elevada resistência mecânica, diminuindo consideravelmente a tendência a laminação. Após a queima, apresentam elevada resistência mecânica e geralmente baixa o teor de absorção de água, afirmam AMARANTE JÚNIOR e PRACIDELLI (1979).

Durante o estudo do efeito dos aditivos sobre o processo de compactação, é conveniente fazer uma divisão entre massas que contêm uma proporção elevada de argila e que não necessitam de aditivos orgânicos (que atuem como ligantes, plastificantes ou lubrificantes) às demais massas, nas quais são necessários adicionar aditivos. No caso de composições argilosas, a fração coloidal de partículas atua como ligante e a água como plastificante. Nestas composições, a distribuição do tamanho de partículas é muito mais larga que nas demais, a compactidade final da peça também é mais alta. Por isto, durante a compactação destas composições, empregando-se pressões elevadas e umidade da massa também elevada, a água pode vir a saturar os poros existentes na peça, impedindo sua posterior compactação. Este fenômeno não se verifica em composições não-argilosas (ALBARO, 2001).

Segundo SANTANA (2002), os ligantes orgânicos, que são aditivos essenciais para o processamento de muitas cerâmicas comerciais, e cuja função em processamento cerâmico é inteiramente temporária, devem ser removidos completamente antes da sinterização da peça. Este processo é usualmente alcançado pelo aquecimento da peça até os aditivos de processamento evaporarem ou degradarem formando produtos voláteis, que escapam para o ambiente através dos poros da matriz cerâmica.

2.7.2 - Defloculantes

Para BÖEING (2003), defloculante é toda substância que reduz a viscosidade, dispersa as partículas em uma suspensão aquosa tornando-a mais fluída. Quando introduzida em pequenas quantidades numa massa fluída, essa substância é capaz de impedir a aglomeração das partículas coloidais e sua precipitação.

Um bom efeito dispersante se traduz em um alto valor do *potencial zeta* com a mínima viscosidade. As partículas de uma suspensão são carregadas eletricamente e possuem uma atração devido às forças de *Van der Waals*, ocasionando uma tendência à aglomeração.

O defloculante proporciona à suspensão uma carga global negativa, logo o potencial de repulsão das partículas denomina-se *potencial zeta*. Quando as partículas estão relativamente distantes umas das outras ou dispersas, obtém-se uma suspensão uniforme e fluída.

Os defloculantes controlam o pH e a variação da superfície das partículas, dispersão ou coagulação, daí sua importância no processamento cerâmico, devendo, por isso, os processos de defloculação e coagulação ser cuidadosamente controlados.

Um *fluidificante* é toda substância que garante a dispersão evitando a rápida aglutinação e conseqüentemente a precipitação das partículas sólidas. O fluidificante é capaz de baixar a viscosidade ao contrário dos espessantes, que aumentam a consistência de uma massa fluída. “Os defloculantes atuam como fluidificantes, porém nem todos os fluidificantes são defloculantes”

A *defloculação* é, pois, o processo de separação recíproca das partículas coloidais no fluido dispersante, pela ação eletrostática repulsiva que o defloculante induz no meio.

2.7.3 - Plastificantes

Os plastificantes são aditivos usados para modificar as propriedades viscoelásticas do sistema ligante-partícula, que possuem as seguintes características: *têm moléculas menores que as do ligante; reduzem as forças de Van*

der Waals; aumentam a flexibilidade; diminuem a temperatura de transição vítrea (Tg) e reduzem a resistência mecânica, favorecendo a deformação plástica ou granulada.

A presença de um plastificante promove o amolecimento e aumenta a flexibilidade do ligante, mas também reduz sua resistência. Quando o sistema for exposto a elevadas temperaturas, como, por exemplo, no “*spray drying*”, deve-se usar um plastificante com alto ponto de ebulição, como o etileno glicol ou glicerol. O etileno glicol é muito eficiente no abaixamento da Tg e é relativamente barato; sua ação como plastificante diminui com o aumento do seu peso molecular.

A ação dos plastificantes proporciona:

- redução da taxa de migração do líquido (agente de retenção);
- alteração do líquido requerido, diminuindo-o (agente de consistência);
- melhoria da resistência a verde (ligante).

Na Tabela 2.2, encontram-se os plastificantes mais utilizados e suas temperaturas de fusão, ebulição e peso molecular.

TABELA 2.2 – Plastificantes mais utilizados (REED, 1995).

PLASTIFICANTE	TEMPERATURA DE FUSÃO (°C)	TEMPERATURA DE EBULIÇÃO (°C)	PESO MOLECULAR (g/mol)
Água	0	100	18
Etileno Glicol	-13	197	62
Dietileno Glicol	-8	245	106
Trietileno Glicol	-7	288	150
Tetraetileno Glicol	-5	327	194
Polietileno Glicol	-10	>330	300
Glicerol	18	290	92
Dibutil Ftalato		340	278
Dimetil Ftalato	1	284	194

Segundo CHIARA, BORRONI e CHIARA (2000), os plastificantes são aditivos naturais e sintéticos. São utilizados para tornar mais plástica a matéria-prima base e se fazem muito úteis na fase de conformação.

Nas argilas plásticas atuam tanto na conformação como na secagem e queima. Tornam a massa mais fácil à extrusão, mais resistente à movimentação a verde e a seco e, portanto, torna mais ágil a carga dos carros do forno. Agem ainda positivamente sobre as características físicas e mecânicas tornando possível a obtenção de um produto mais qualificado.

Alguns produtos químicos, como os lignosulfurados, são utilizados para incrementar a capacidade de extrusão e aumentar a resistência a seco. Por não trazerem benefícios à resistência do material queimado, faz-se necessário que estes aditivos não sejam de base alcalina, para que se evitem danos aos refratários do forno. Diversos outros derivados ou rejeitos industriais como os resíduos da indústria de lã, são também utilizados como aditivos.

São também usados areias feldspáticas, basálticas e óxidos de ferro, que são materiais cada vez mais utilizados em função de processos rápidos de queima e para a produção de artigos de elevada qualidade. E ainda têm a função de conter as retrações na queima ou evitar que estas ocorram muito repentinamente. São compostos que agem como inerte na fase de secagem, enquanto na queima atuam como fundentes e melhoram a qualidade do produto e, de acordo com a temperatura, se tem maior retração, resistência mecânica mais elevada, menor absorção de água, etc.

2.7.4 - Surfactantes

Para REED (1995), os surfactantes são moléculas com uma extremidade apolar e outra polar, chamadas *agentes de molhamento*. Trata-se de aditivos que possuem a função de reduzir a tensão superficial ou interfacial, promovendo um molhamento e uma dispersão.

Os surfactantes podem ser divididos em três tipos: os *não iônicos*, os *aniônicos* e os *catiônicos*. Surfactantes não iônicos são moléculas que possuem extremidades polares e não polares, que não ionizam quando dissolvidos em líquidos. Surfactantes aniônicos têm grupo liofóbico relativamente grande, que é comumente uma longa cadeia de hidrocarbonos, e um grupo liofílico carregado negativamente, que é a superfície ativa da molécula. Podendo ser adsorvido em partículas positivas, este tipo de surfactante é largamente utilizado na indústria. Já

os surfactantes catiônicos têm grupo liofílico carregado positivamente e são muitas vezes tóxicos, por serem fortemente adsorvidos em superfícies negativas de argilominerais.

Surfactantes, como o ácido esteárico ((CH₃)(CH₂)₁₆COOH), são lubrificantes efetivos, porque a extremidade carboxil da molécula pode ser fortemente ligada à superfície óxida, e a resistência ao cisalhamento entre a primeira camada adsorvida

Na Tabela 2.3, encontram-se exemplos de surfactantes.

TABELA 2.3 - Exemplos de surfactantes (REED, 1995).

TIPO	NOME GENÉRICO	COMPOSIÇÃO
Não Iônico	Nonilfenol	C ₉ H ₁₉ (C ₄ H ₄)O(CH ₂ CH ₂ O) ₁₀ H
	Álcool tridecil	C ₁₃ H ₂₇ (CH ₂ CH ₂ O) ₁₂ H
Aniônico	Estearato de sódio	C ₁₇ H ₃₅ COO ⁻ Na ⁺
	Sulfonato disopropilnaftaleno de sódio	(C ₃ H ₇) ₂ C ₁₀ H ₅ SO ₃ ⁻ Na ⁺
Catiônico	Cloreto dodeciltrimetilamônio	[C ₁₂ H ₂₅ N(CH ₃) ₃] ⁺ Cl ⁻

A Figura 2.7, mostra a estrutura de uma molécula surfactante, sua adsorção orientada no sistema água-óleo e a interface água-ar.

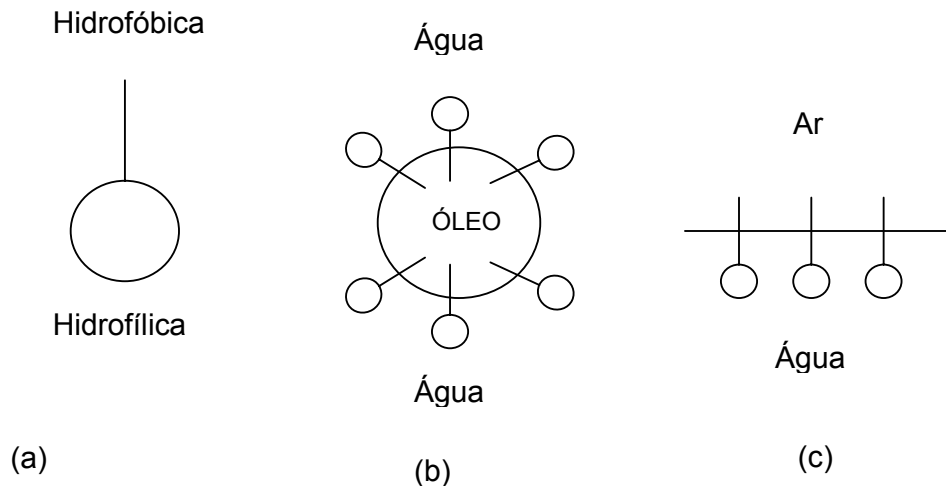


Figura 2.7: Modelo de (a) estrutura de uma molécula surfactante; (b) sua adsorção orientada no sistema água-óleo e (c) a interface água-ar (REED, 1995).

Quando surfactante é adicionado a um líquido polar, suas moléculas com extremidade polar e outra apolar tendem a concentrar a extremidade liofílica adsorvida ao líquido polar. Uma concentração de apenas 0,01% a 0,2% pode reduzir significativamente a tensão superficial do líquido e promover o molhamento do sólido suspenso. Desta forma, os surfactantes são muitas vezes chamados de agentes de molhamento.

Moléculas surfactantes podem também garantir uma compatibilidade de um sólido com o meio líquido, quando elas são adsorvidas na interface. Quando adicionadas juntamente com um pó óxido em um líquido não polar, o surfactante será adsorvido com a extremidade liofóbica no líquido. Quando se tem uma suspensão de argila-água, a extremidade liofílica é projetada para o interior da água, e a extremidade liofóbica é ligada à superfície da argila.

Os surfactantes possam ainda ser chamados de emulsificantes. Isto ocorre quando a adição de um surfactante de baixa tensão superficial produz uma dispersão estável de finas gotas de um líquido em outro.

Os líquidos são utilizados no processamento cerâmicos para molhar as partículas cerâmicas e melhorar a viscosidade do meio entre elas, dissolver sais, compostos e substâncias poliméricas.

2.7.5 – Características reológicas da mistura

Para BRUMATI (1995), é importante que a mistura pó-ligante satisfaça vários critérios reológicos que permitam a moldagem de peças sem defeitos. Essas características reológicas são dependentes do ligante, da temperatura de moldagem, da taxa de cisalhamento, do conteúdo de sólidos, das características das partículas e da presença de agentes surfactantes.

A propriedade reológica mais importante é a viscosidade, que correlaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento. Uma viscosidade muito alta dificulta a moldagem, enquanto uma muito baixa pode acarretar a segregação do pó. Outra propriedade importante é a elasticidade, que faz com que um material sujeito a uma tensão abaixo do seu ponto de escoamento tenda a recuperar sua forma original, ao ser retirada a tensão. *Não serão abordados nesta tese os aspectos*

referentes às manifestações elásticas das misturas pó-ligante usadas em processamentos cerâmicos.

Quanto às características da mistura pó-ligante, o ideal é que as partículas empacotadas toquem umas as outras, com o ligante ocupando o espaço entre elas, sem a presença de poros. Na realidade, um pequeno excesso de ligante, de 2 a 15% do volume entre as partículas, é necessário para que a mistura apresente boas características reológicas.

Para ONODA e HENCH (1978), em processamentos cerâmicos por extrusão usam-se ligantes dissolvidos ou dispersos em líquidos. Os ligantes são dissolvidos molecularmente em água ou em solvente orgânico. A fase líquida é importante para dispersar uniformemente por toda a fase das partículas, e para promover a fluidez da plasticidade no processo de extrusão. Os ligantes orgânicos afetam fortemente a reologia da fase líquida, pois na maioria dos casos, aumentam a viscosidade e mudam as características de fluxo de newtoniano para pseudoplástico. A reologia da solução afeta o comportamento de suspensões e pastas formadas pelo acréscimo de partículas à solução. Portanto, a aplicabilidade de um ligante orgânico para um processo cerâmico específico depende das características reológicas da solução desse ligante.

Ainda de acordo com ONODA e HENCH (1978), há uma tendência a que os derivados da celulose estejam predominantemente nas faixas de média e alta viscosidade.

2.8 – Blocos Cerâmicos

A Associação Nacional da Indústria de Cerâmica (ANICER) define os blocos cerâmicos como componentes construtivos utilizados em alvenaria, com furos de variados formatos, paralelos a qualquer um dos seus eixos.

Sua conformação ocorre por extrusão, processo em que a massa de argila é pressionada através do molde que dará a forma da seção transversal. A coluna extrudada obtida, passa por um cortador, onde se tem a dimensão do componente, perpendicular à seção transversal. Posteriormente, os blocos são submetidos à secagem, e a queima é feita a temperaturas que variam entre 900°C e 1100°C.

2.8.1 - Tipos

São dois os tipos de blocos cerâmicos utilizados na construção civil, e produzidos no Brasil.

- *Blocos de vedação*

São aqueles destinados à execução de paredes que suportarão o peso próprio, e a pequenas cargas de ocupação (armários, pias, lavatórios, etc), geralmente utilizados com furos na horizontal e com atual tendência ao uso com furos na vertical.

- *Blocos estruturais ou portantes*

São aqueles que, além de exercerem a função de vedação, também são destinados à execução de paredes que constituirão a estrutura resistente da edificação, podendo substituir pilares e vigas de concreto. Estes blocos são utilizados com os furos sempre na vertical.

Com relação à proporção de furos ou canais, este tipo de blocos pode apresentar um percentual de 25% a 40% da área bruta, comportando-se como tijolos maciços (*componente sem furos*), sem a necessidade do uso do graute (argamassa).

2.8.2 – Vantagens

A utilização de blocos cerâmicos, apresenta as seguintes vantagens:

- leveza (decréscimo do custo das fundações);
- isolamento térmico e acústico;
- construção racionalizada;
- simplificação do detalhamento de projetos, facilitando a integração dos mesmos;
- diminuição do desperdício dos materiais (componente, argamassa de assentamento e reboco);
- decréscimo na espessura de revestimento (emboço ou reboco);
- canteiro de obra menos congestionado e espaço mais limpo;
- facilidade na verticalização das paredes;

- utilização de componentes pré-moldados (vergas, contra-vergas etc);
- fácil execução das instalações hidrosanitárias e elétricas, no caso de blocos especiais (aqueles que apresentam espaços pré-definidos para as instalações).

2.8.3 - Principais índices de qualidade

Os blocos cerâmicos devem trazer gravados, em alto ou baixo relevo, o nome do fabricante, o município onde está localizada a cerâmica e as dimensões do bloco, em centímetros. Além disso, devem apresentar as seguintes características;

- regularidade de formas e dimensões;
- arestas vivas e cantos resistentes;
- inexistência de trincas, fendas, cavidades;
- cor de queima uniforme (produzir som metálico quando percutido);
- facilidade de corte (grãos finos e cor uniforme).

Além dos índices de qualidade acima, os blocos devem estar em conformidade com as normas vigentes no que diz respeito às características visuais, geométricas, físicas e mecânicas, segundo as seguintes normas técnicas em vigor: NBR 6461(1983), NBR 7171(1992), NBR 8042(1992) e NBR 8043(1983), de acordo com a ANICER (2004).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais estudados e os métodos de ensaios utilizados para viabilização da pesquisa. Os materiais serão, a seguir, relacionados, com a identificação de sua procedência. Todo procedimento experimental foi realizado nos laboratórios da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, no Campus I.

Para a escolha dos materiais (massa industrial e blocos cerâmicos), foi realizado um levantamento das indústrias cerâmicas paraibanas, através do catálogo da FIEP – Federação das Indústrias do Estado da Paraíba - dos catálogos telefônicos da TELEMAR e informações de terceiros.

3.1 – MATERIAIS

3.1.1 – Massas Industriais e Blocos Cerâmicos

Foram selecionadas massas industriais e blocos cerâmicos de 8 furos de cinco indústrias de cerâmicas vermelhas oriundas de diferentes bacias hidrográficas do Estado da Paraíba.

As amostras foram identificadas com as seguintes informações: nome e local da indústria cerâmica produtora. A identificação das amostras de massas industriais foi feita em ordem alfabética. Amostra **A**; Amostra **B**; Amostra **C**; Amostra **D** e Amostra **E**. A relação das indústrias cerâmicas que forneceram material (massa e blocos cerâmicos), sua localização geográfica e respectiva bacia hidrográfica, encontra-se no Anexo II.

Coletas das Amostras

Cada amostra coletada consistia de 120 kg de massa, matéria-prima usada na fabricação de blocos cerâmicos, tendo sido usado para os ensaios cerca de 50kg.

Foram coletadas na linha de produção das indústrias cerâmicas que produzem blocos cerâmicos de oito furos. Todas são misturas de duas argilas com diferentes comportamentos plásticos: uma mais plástica e uma menos plástica.

Os blocos foram coletados nas mesmas unidades fabris que forneceram a massa industrial.

Características das amostras

As amostras A, B e C são de origem quaternária recente, enquanto que as amostras D e E são massas de argilas plástica coletadas em limpeza de barreiros.

Geologia

- As argilas de origem quaternária recente, como as planícies aluviais (várzea de rios) resultante de inundação do baixo Paraíba, apresentam-se na forma de agregados duros e densos, de difícil desagregação manual com queima avermelhada.

- As argilas arenosas de origem quaternária recente resultantes de várzeas lacustres, apresentam-se na forma de agregados de fácil desagregação manual e de cor cinza clara com cor de queima vermelha.

É importante enfatizar que estas indústrias cerâmicas não possuem fornos com queima controlada, não sendo possível obter dados precisos da temperatura de queima, podendo-se sugerir que a queima é efetivada na faixa de temperatura de 700°C a 900°C.

3.1.2 - Aditivos

A escolha dos aditivos para utilização no tratamento das cinco amostras de massa anteriormente citadas foi realizada com base em informações técnicas, em que alguns aditivos químicos foram usados como produtos que auxiliam no processamento cerâmico. Procurou-se adotar compostos bem diversificados, alguns floculantes, outros defloculantes, alguns deles de utilização já conhecida como produtos que melhoram as propriedades físico-mecânicas de materiais cerâmicos. São os seguintes os aditivos utilizados na presente pesquisa:

A1 – Amido Solúvel – P.A.

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Vetec Química Fina.

A2 – Bentonita Cálcica

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Bentonita União Nordeste S/A.

A3 – Bentonita Sódica

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Bentonita União Nordeste S/A.

A4 – Carbonato de Sódio – Anidro (Na_2CO_3)

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Vetec Química Fina.

A5 – Carboximetilcelulose - CMC – Sal Sódico

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Synth.

A6 - Cloreto de Magnésio – Hexahidratado – $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Nuclear.

A7 – Detergente em pó “ALA”

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Lever Igarassu S/A. Esses valores se referem à massa do produto na forma como é comercializado. Sua composição provável: Tensoativo alquil benzeno sulfonato de sódio.

A8 - Dextrina Branca – $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n \cdot x\text{H}_2\text{O}$

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Vetec Química Fina.

A9 – Hexametáfosfato de Sódio – $(\text{NaPO}_3)_n$

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Vetec Química Fina.

A10 – Silicato de Sódio – Puro - $(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$

Foi utilizado na forma de pó, como é comercializado pela Vetec Química Fina.

3.2 – MÉTODOS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa consiste nas etapas descritas a seguir conforme atividades desenvolvidas e ensaios realizados nas amostras de massas plásticas industriais e blocos cerâmicos estudados.

3.2.1 – Caracterização Física e Mineralógica

A caracterização física é constituída pela análise granulométrica por tamanho de partículas a laser e pelas características de plasticidade. A mineralógica é constituída pela análise química (AQ), análise térmica diferencial (ATD), análise termogravimétrica (ATG) e pela difração de raios-X (DRX).

A Figura 3.1 mostra o fluxograma com as etapas dos ensaios realizados nas massas industriais em análise.

3.2.1.1 - Análise granulométrica

A distribuição granulométrica exerce papel fundamental no processamento e nas propriedades dos diversos tipos de produtos cerâmicos.

As análises granulométricas foram determinadas por via úmida com material passado 100% em peneira ABNT n°. 80 (0,177 mm), por meio de um sistema analisador de tamanho de partículas por difração a laser (granulômetro), marca Cilas, modelo 1064 LD (Fig. 3.2), que possui faixa analítica de 0,04 a 500 microns, e emissores de laser secundários para uma melhor precisão na faixa do sub-mícron.



Figura 3.2: Aparelho analisador de tamanho de partículas por difração a laser – granulômetro - modelo 1064 LD da Cilas.

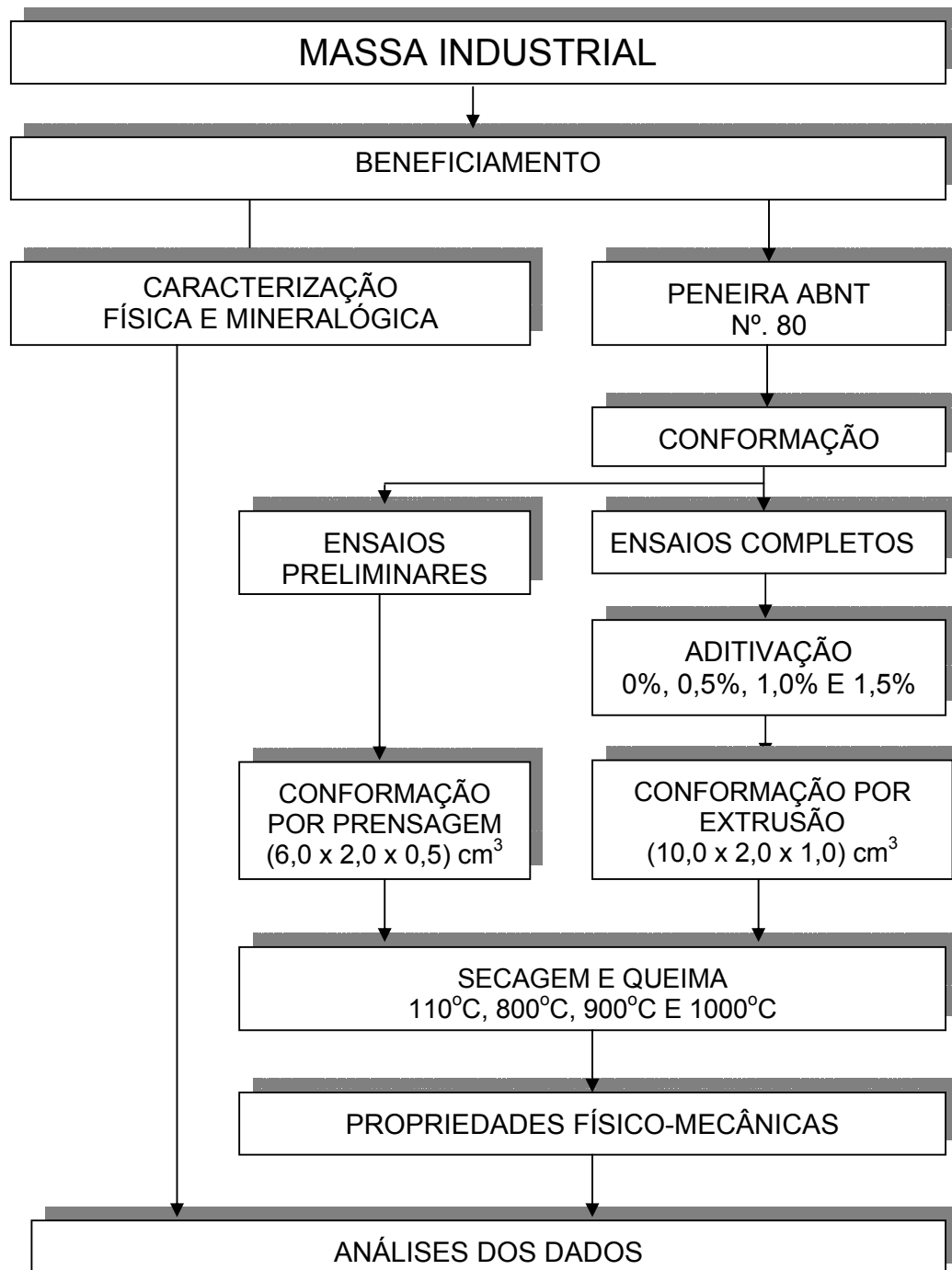


Figura 3.1: Fluxograma dos ensaios realizados com as massas industriais e aditivadas.

3.2.1.2 – Índices de Atterberg

O limite de plasticidade corresponde à quantidade de água mínima necessária para uma massa cerâmica alcançar o estado plástico e, portanto, ser moldada por extrusão.

As amostras foram passadas em peneira ABNT n°. 40 (0,420 mm), em seguida foram determinadas as características de plasticidade: limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), segundo o método da NBR 6459(1984) e NBR 7180(1984).

3.2.1.3 – Análise Química (AQ)

A análise química representa uma das análises mais importantes para se obter e manter um alto nível de qualidade no ciclo produtivo, apesar de não permitir uma avaliação completa da composição mineralógica e das propriedades físico-químicas e tecnológicas.

Em uma análise química clássica normalmente se determinam: o teor de umidade, a perda ao fogo, a matéria orgânica e os óxidos presentes, tais como: Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , Na_2O , CaO e K_2O .

As amostras foram passadas em peneira ABNT n°. 100 (0,149 mm) e submetidas à análise química, segundo técnicas clássicas, instrumentais e complexiométricas, seguindo as normas do LAM/CCT/UFCG.

3.2.1.4 – Análises Térmicas (ATD e ATG)

As análises termodiferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG) são úteis em processamento cerâmico para indicar as faixas de temperaturas em que ocorrem transformações endotérmicas e exotérmicas e as temperaturas onde ocorrem as perdas de massa, respectivamente. As mudanças de temperatura na amostra são devidas às transições ou às reações entálpicas exotérmicas ou endotérmicas, tais como aquelas causadas por mudanças de fase, fusão, reações de desidratação, reações de decomposição, destruição da rede cristalina e outras reações químicas.

A termogravimetria (TG) determina a variação da massa da amostra (perda ou ganho de massa) como uma função da temperatura ou do tempo.

As amostras foram passadas em peneira ABNT n°. 200 (0,074 mm), e submetidas às análises térmicas através de um sistema de análises térmicas, modelo RB-3000 da BP Engenharia (Fig. 3.3), com razão de aquecimento 12°C/min. A temperatura máxima para ATD e ATG foi de 1000°C e o padrão utilizado na ATD foi óxido de alumínio (Al_2O_3), calcinado.



Figura 3.3: Aparelho de Análise Térmica, modelo RB-3000 da BP Engenharia.

3.2.1.5 – Difração de Raios-X (DRX)

O método mais utilizado para determinar a mineralogia das matérias-primas cerâmicas é a difração de raios-X. Esse método consiste em fazer incidir um feixe de raios-X, previamente colimado e de comprimento de onda conhecido, sobre uma lâmina de pó, que gira no centro do goniômetro. O feixe de raios-X se difrata e reflete com ângulos que são característicos do retículo cristalino de cada substância, obtendo-se o correspondente difratograma (SANTANA, 2002).

As análises de difração de raios-X das amostras de massas plásticas para cerâmica vermelha, na forma seca após passar em peneira ABNT n°. 200 (0,074 mm), foram realizadas em equipamento modelo XRD 6000 da Shimadzu (Fig. 3.4), operando com radiação k-alfa de cobre, 30 kV e 40 mA, com varredura entre 2θ (3°) e 2θ (30°) e com velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$.



Figura 3.4: Aparelho de difração de raios-X, modelo XRD 6000 da Shimadzu.

3.2.2 – Caracterização Tecnológica Preliminar

Amostras foram submetidas ao ensaio preliminar de massas para cerâmica vermelha, segundo a sistemática proposta por SOUZA SANTOS (1992).

3.2.2.1 - Preparação das massas

As amostras de massas plásticas industriais foram submetidas às seguintes etapas de preparação.

Secagem - Na sua forma natural, as amostras foram secas à temperatura ambiente e, em seguida, em estufa, à temperatura de 110°C, até massa constante.

Moagem - Por uma questão de uniformidade na comparação das propriedades, as amostras foram submetidas a uma moagem realizada, por via seca, em um moinho do tipo galga.

3.2.2.2 - Conformação por prensagem

As massas previamente moídas foram passadas por via seca em peneira ABNT n° 80 (0,177 mm). Em seguida, adicionou-se água à massa na quantidade igual a metade do limite de plasticidade da massa original para obtenção de uma massa plástica que possibilitasse a moldagem por prensagem dos corpos de prova, em forma de lâminas prismáticas de dimensões (6,0 x 2,0 x 0,5) cm³, em molde de aço sob pressão estática de 20 MPa e a uma velocidade constante de 0,25 mm/min. Na etapa seguinte, todos os corpos de prova foram secos a 110°C, por 24 h (Fig. 3.1). As temperaturas de queima foram 800°C, 900°C e 1000°C, em atmosfera oxidante, com velocidade constante de 2°C/min de taxa de aquecimento, tendo permanecido na temperatura máxima por 2 h, completando um ciclo de queima de 10 h. O resfriamento se deu naturalmente até a temperatura ambiente. Foram avaliados cinco corpos de prova para cada temperatura.

3.2.2.3 - Propriedades físico-mecânicas

Os corpos de prova foram secos 110°C e submetidos aos *ensaios de umidade de prensagem, retração linear de secagem e tensão de ruptura à flexão*. Os demais corpos de prova, após queima às temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, foram submetidos aos seguintes ensaios: *absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, retração linear de queima, perda ao fogo e tensão de ruptura à flexão*, conforme metodologia proposta por SOUZA SANTOS (1992).

3.2.3 – Caracterização Tecnológica Completa com Massas Industriais e Aditivadas

Os ensaios tecnológicos completos foram realizados segundo a sistemática proposta pela American Ceramic Society e adaptada por SOUZA SANTOS (1992).

3.2.3.1 – Índices de Atterberg com massas aditivadas

As amostras após serem preparadas conforme o item 3.2.1.2, foram tratadas com os dez aditivos químicos nos teores 0,5; 1,0 e 1,5% por 100 g de massa seca. Assim para cada teor de aditivo foram obtidos valores cuja média é apresentada como resultado e que representam a variação dos índices de Atterberg em função da concentração de aditivos.

3.2.3.2 – Preparação das massas

Nesta etapa, as massas A, B, C, D e E, previamente preparadas, conforme descrito no item 3.2.2.1, passadas por via seca em peneira ABNT n° 80 (0,177 mm), misturadas em uma masseira modelo Blakeslee, com capacidade de 30 L (Fig. 3.5), a uma velocidade média de 90 rpm, com a umidade fabril (ver Tabela 3.1 e Figura 3.1, para as amostras industriais).

As amostras aditivadas foram tratadas nas proporções de 0,5; 1,0 e 1,5% de aditivo para 100 g de massa seca e umidificadas por um processo de gotejamento manual, com uma solução de água + aditivo, com a umidade igual ao limite de

plasticidade da massa aditivada (Fig. 3.1). Em seguida, foram acondicionadas em saco plástico para um processo de cura por um período de cinco dias.



TABELA 3.1 – Umidade de extrusão de cada uma das unidades fabris.

AMOSTRAS	UMIDADE DE EXTRUSÃO (%)
A	19,39
B	19,09
C	19,97
D	18,15
E	20,87

Figura 3.5: Foto da masseira.

3.2.3.3 – Moldagem por extrusão

Foram confeccionados corpos de prova por extrusão a um vácuo de 84,66 KPa, com hélices de 10 cm de diâmetro, a uma velocidade constante de 5 cm/s, em boquilha de seção retangular, em extrusora de laboratório tipo Verdés, modelo BR 051. Na etapa seguinte, todos os corpos de prova ficaram em repouso à temperatura ambiente por um período mínimo de 24 h, quando foram secos em estufa a 110°C por mais um período de 24 h e posteriormente sinterizados nas temperaturas de queima de 800°C, 900°C e 1000°C, em atmosfera oxidante, com uma taxa de aquecimento de 2°C/min da temperatura ambiente (~ 30°C), até a temperatura máxima, onde foi mantido em patamar por 2 h, completando assim um ciclo de queima de aproximadamente 10 h (Fig. 3.1). O resfriamento foi realizado naturalmente.

3.2.4 – Blocos Cerâmicos

3.2.4.1 – Preparação dos corpos de prova

Os blocos cerâmicos referentes às massas A, B, C, D e E, queimados na respectiva unidade fabril, foram cortados nas dimensões (10,0 x 2,0 x 1,0) cm³, conforme descrito no fluxograma da Figura 3.6. Com os corpos de provas retirados

dos blocos, foi possível realizar os ensaios das propriedades físico-mecânicas e comparar com os corpos de provas moldados em laboratórios.

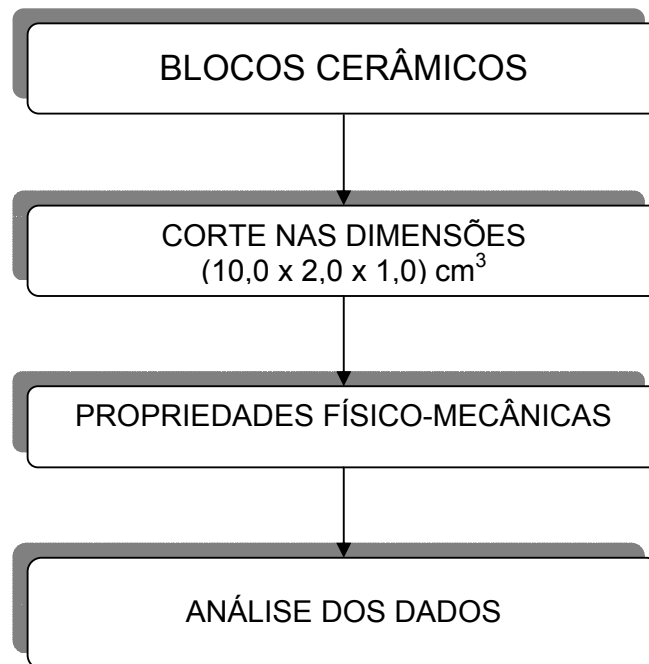


Figura 3.6: Fluxograma dos ensaios realizados com os corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos.

3.2.4.2 – Propriedades físico-mecânicas

Foram efetuados ensaios físico-mecânicos nos corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos industrializados, sendo determinadas as seguintes propriedades: *absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão* com carregamento de três pontos.

Adicionalmente foram realizados ensaios físicos e mecânicos nas amostras dos blocos cerâmicos industrializados de oito furos. Foram determinadas a absorção de água e a resistência mecânica *à compressão simples*, de acordo com os métodos de ensaios propostos nas normas técnicas da ABNT, NBR 8947(1985) e NBR 6461(1983), respectivamente.

Com exceção das análises químicas que foram realizadas no Laboratório de Análise Mineral, LAM/UFCG e dos ensaios de plasticidade, que foram realizados no Laboratório de Solos I do DEC/UFCG, os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica do DEMa/CCT/UFCG.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE OS ENSAIOS COM AS MASSAS INDUSTRIAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios de caracterização física, mineralógica e tecnológica com as massas industriais, oriundas de cinco diferentes indústrias de blocos cerâmicos, instaladas no Estado da Paraíba. A caracterização física inclui a análise granulométrica em analisador de partículas por difração a laser e as características de plasticidade pelo método de Casagrande da massa industrial. A caracterização mineralógica inclui a análise química, as análises termodiferencial e termogravimétrica e a difração de raios-X, e a caracterização tecnológica inclui os ensaios preliminares e completos que mostram os resultados das propriedades físico-mecânicas, realizados em corpos de prova confeccionados com as massas industriais.

4.1 – Caracterização Física e Mineralógica

Os resultados dos ensaios de caracterização física das massas plásticas foram comparados com os resultados existentes em VIEIRA, HOLANDA e PINATTI (2000) e em ALVES, VIEIRA e MONTEIRO (2004).

4.1.1– Análise granulométrica

A Figura 4.1 apresenta a distribuição granulométrica por tamanho de partículas das massas industriais ensaiadas. Nota-se que as amostras apresentam um baixo percentual da fração argila. É comum considerar-se a fração argila como aquela com granulometria abaixo de 0,002 mm. Assim a fração argila teria partículas menores que 2 μm , a fração silte, entre 2 e 20 μm , e a fração areia, teria as partículas com diâmetros superiores a 20 μm . A fração argila está relacionada, sobretudo, aos minerais argilosos, que são os responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade do sistema argila+água (ALVES, VIEIRA e MONTEIRO, 2004).

Analisando as curvas da citada figura, nota-se que esta fração varia de 7,63% para a amostra **E** a 18,09% para a amostra **C**. A fração silte varia de 54,41% para a amostra **A** a 70,34% para a amostra **C**. Já a fração areia varia de 11,57% para a amostra **C** a 37,73% para a amostra **A**.

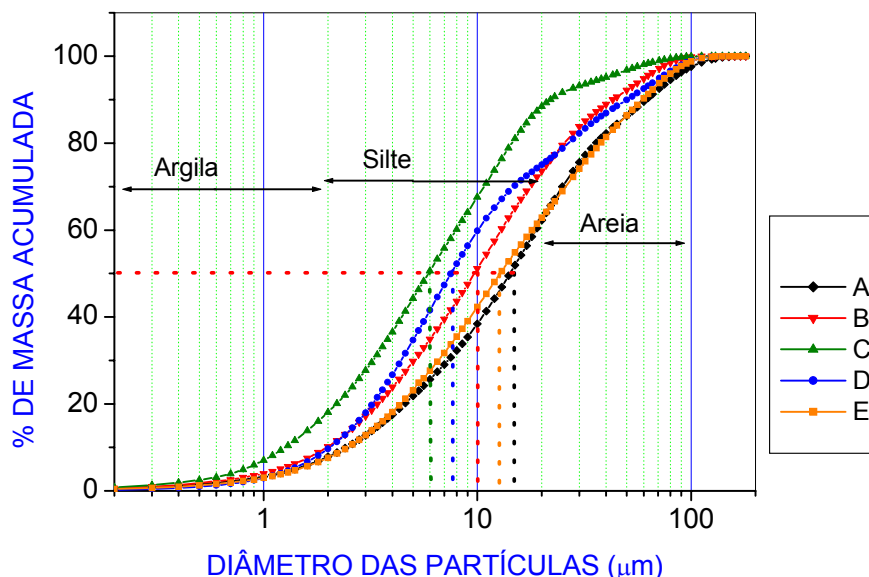


Figura 4.1: Distribuição granulométrica das massas estudadas por tamanho de partículas a laser.

A Tabela 4.1, a seguir, apresenta dados do tamanho de partículas, por difração a laser, onde se nota que a amostra **A** é a que apresenta um maior diâmetro médio, e a amostra **C**, o menor, ou seja, a menos argilosa e a mais argilosa, respectivamente. O que pode também ser observado pelas linhas pontilhadas constantes na Figura 4.1. A amostra **A** apresenta uma granulometria muito próxima da amostra **E**, embora sejam de bacias hidrográficas diferentes. Em síntese, a análise granulométrica mostra que as massas industriais estudadas são granulometricamente formadas com predomínio das frações silte mais areia, dificultando uma associação com os dados de plasticidade, pois a fração argila apresenta uma faixa de valores muito pequena entre as amostras analisadas.

TABELA 4.1 – Tamanho das partículas por difração a laser.

AMOSTRAS	DIÂMETRO A 50% (μm) (DA MASSA ACUMULADA)	DIÂMETRO MÉDIO (μm)
A	14,20	23,48
B	9,68	16,60
C	5,89	10,40
D	7,52	17,18
E	12,77	22,41

4.1.2 – Índices de Atterberg

A Tabela 4.2, a seguir, mostra os índices de Atterberg (LL, LP e IP) das amostras estudadas. O limite de liquidez corresponde à máxima quantidade de água que uma massa cerâmica possa conter para ser moldável no estado plástico. Observa-se que foram obtidos valores variando de 34,8% (amostra **E**) a 40,0% (amostra **B**). Comparando esses resultados com os determinados por VIEIRA, HOLANDA e PINATTI (2000), observa-se que estão dentro da faixa de valores (30 a 60%), previstos nestes estudos. O limite de plasticidade corresponde à quantidade de água mínima necessária para que uma massa possa alcançar o estado plástico e, portanto, ser moldada por extrusão. Verifica-se que a faixa de valores variou de 17,8% (amostra **E**) a 20,5% (amostra **A**). Os valores normalmente empregados e recomendados (ALVES, VIEIRA e MONTEIRO, 2004) para cerâmica vermelha situam-se entre 18 a 26%. Observa-se ainda que as amostras analisadas apresentam limites de plasticidade próximos, o que é justificado pela pequena faixa de valores da fração argila encontrada na análise granulométrica, mesmo assim, estão na faixa recomendada para massa de cerâmica vermelha. Já o índice de plasticidade indica a faixa de consistência plástica de uma massa argilosa. Nota-se que a faixa de valores variou de 17,0% (amostra **E**) a 21,0% (amostra **B**). Quanto maior o índice de plasticidade maiores serão a plasticidade e a faixa de consistência de uma massa cerâmica. Para cerâmica vermelha, são sugeridos IP de 10 a 20%, logo as amostras estudadas estão dentro da faixa de valores das massas utilizadas em cerâmica vermelha, moldadas pelo processo de extrusão, segundo (VIEIRA, HOLANDA e PINATTI, 2000).

A plasticidade das massas industriais é uma relação físico-química entre as partículas coloidais de argila e a água, que depende diretamente, entre outros fatores, da composição mineralógica e do tamanho e distribuição de partículas. Em nosso estudo, nota-se que as amostras analisadas apresentaram uma pequena faixa da fração argila entre elas, dificultando uma associação entre a análise granulométrica e as características de plasticidade destas amostras.

TABELA 4.2 - Índices de Atterberg das massas industriais

AMOSTRAS	LIMITE DE LIQUIDEZ (%)	LIMITE DE PLASTICIDADE (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)
A	38,5	20,5	18,0
B	40,0	19,0	21,0
C	37,5	19,8	17,7
D	38,9	18,8	20,1
E	34,8	17,8	17,0

4.1.3 – Análises Químicas (AQ)

A Tabela 4.3 apresenta a composição química das amostras de massas plásticas para cerâmica vermelha estudadas.

TABELA 4.3 – Composição química das massas industriais analisadas.

AMOSTRAS	ÓXIDOS (% em peso)								
	PF	RI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
A	9,03	3,08	53,16	20,50	7,20	0,56	4,00	0,92	1,31
B	9,53	3,16	53,52	23,60	6,25	0,56	1,60	0,63	0,88
C	8,38	6,10	44,66	27,80	6,23	0,56	1,60	0,91	1,25
D	7,83	3,38	54,66	24,00	5,56	0,56	1,60	0,80	1,04
E	10,88	3,04	49,62	23,00	7,20	0,56	1,60	0,73	1,45

Al₂O₃ = óxido de alumínio; SiO₂ = óxido de sílica; Fe₂O₃ = óxido de ferro; K₂O = óxido de potássio; CaO = óxido de cálcio; MgO = óxido de magnésio; Na₂O = óxido de sódio; PF = perda ao fogo e RI = resíduo insolúvel.

Com base nos dados da citada tabela verifica-se que as massas industriais analisadas apresentam composição química com teores de SiO₂ e de Al₂O₃, típica de

massas plásticas para cerâmica vermelha. O óxido de ferro (Fe_2O_3) é o principal óxido corante das massas, sendo responsável pela cor vermelha após queima: todas as amostras apresentam teor de Fe_2O_3 superior a 5% e uma perda ao fogo superior a 7%, como verificado por CAMPOS (2002); VIEIRA, SALES e MONTEIRO (2004) e por ALVES, VIEIRA e MONTEIRO (2004). Observa-se adicionalmente, que o fato das amostras apresentarem certas semelhanças em suas composições químicas pode estar relacionado com os altos teores das frações silte e areia em suas composições mineralógicas, observados na análise granulométrica e o predomínio da estrutura caulínica, cujas amostras apresentam baixo teor de óxidos fundentes alcalinos, à exceção da amostra **A**, que apresenta um alto teor de MgO , que pode estar associado a traços de minerais acessórios não identificáveis nos difratogramas de raios X. O maior teor de K_2O registrado para a amostra **E**, é provavelmente proveniente da estrutura cristalina dos minerais micáceos, observado pelo difratograma de raios-X.

Com relação ao uso cerâmico verifica-se que os teores de ferro (Fe_2O_3), superiores a 5,0%, conferem às amostras analisadas após sinterização, a coloração vermelha, cor natural dos blocos cerâmicos produzidos com as massas plásticas estudadas, o que confirma dados da literatura.

4.1.4 – Análises Térmicas (ATD e ATG)

A Figura 4.2, a seguir, apresenta as curvas simultâneas de análise térmica diferencial (ATD) e da análise térmica gravimétrica (ATG) das amostras analisadas.

Em uma análise conjunta do comportamento das curvas de ATD para todas as amostras estudadas, observam-se as seguintes características mineralógicas: picos endotérmicos de média e grande intensidade entre 120 e 140°C, característicos de águas livre e adsorvida; bandas exotérmicas entre 120 e 500°C, típicas da presença de matéria orgânica; picos endotérmicos de média e grande intensidade entre 545 e 575°C, característicos da presença de hidroxilas e pico exotérmico entre 860 e 925°C, de pequena e média intensidade,

característicos da nucleação de mulita, devido ao teor de materiais alcalinos, presentes nas amostras analisadas, segundo a análise química das mesmas.

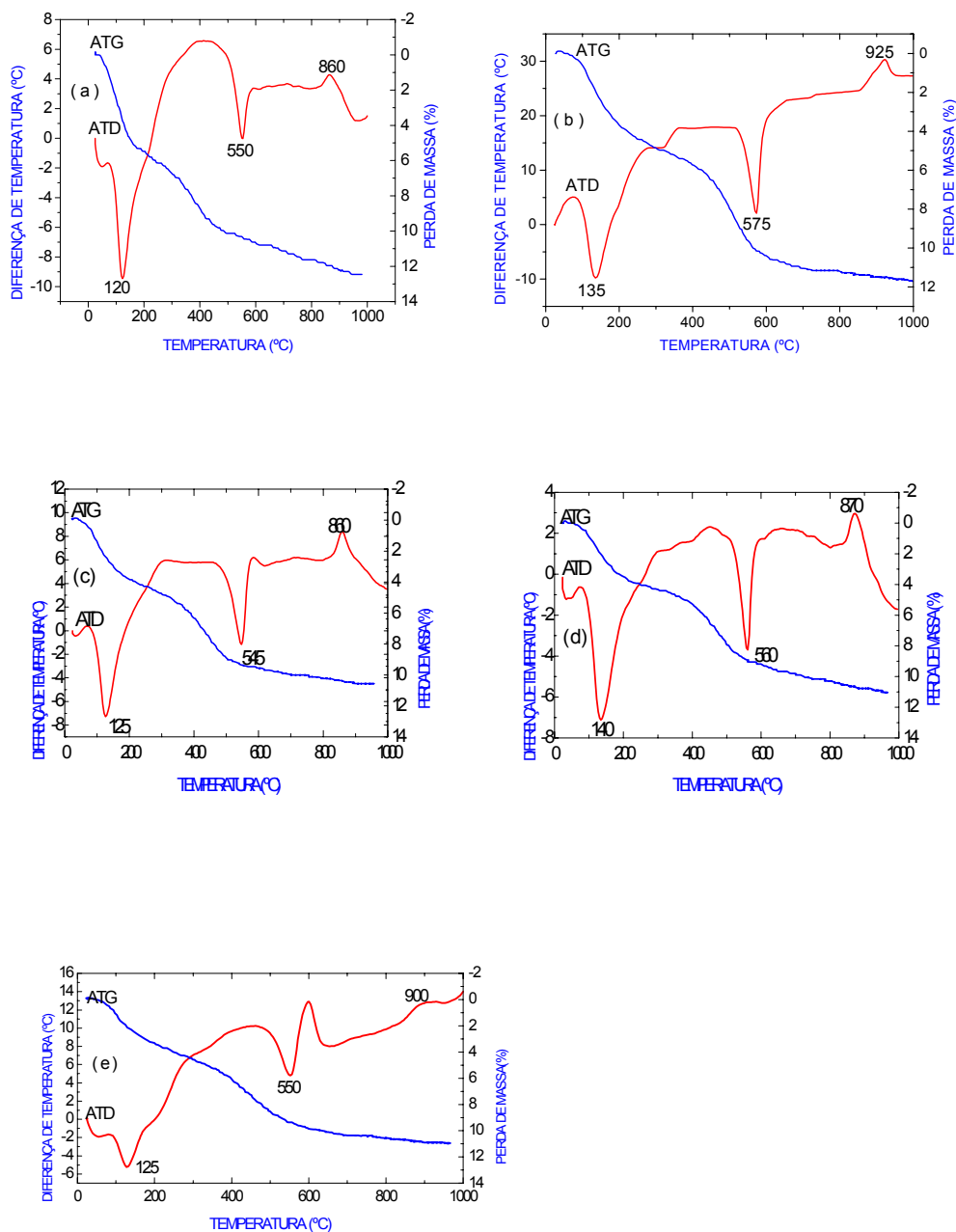


Figura 4.2: Curvas simultâneas de ATD e ATG: (a) amostra A; (b) amostra B; (c) amostra C; (d) amostra D e (e) amostra E.

Analisando as curvas termogravimétricas (ATG) destas amostras, verifica-se que há uma perda de massa média de 11,30%. Observando o comportamento das curvas verifica-se que até 140°C houve uma perda de massa provocada pela

evaporação das águas livre e adsorvida. Entre 140 e 600°C, a perda de massa é correspondente à oxidação da matéria orgânica e à desidroxilação das massas, e, em seguida, acima de 600°C, a perda de massas é essencialmente devida à oxidação da matéria orgânica na forma de grafite.

Em uma análise conjunta das características das curvas de análises térmicas das cinco amostras de massas plásticas para cerâmica vermelha, observa-se que não há registro de picos referente ao alto teor de MgO encontrado na análise química da amostra **A**. Tal fenômeno é explicado em função do material usado nos ensaios termodiferenciais ter sido passado em peneira ABNT 200, o que provavelmente reteve os minerais que contêm o MgO e que não foram identificados nos termogramas e nos difratogramas de raios-X. As perdas de massas são confirmadas pela análise química, que apresenta perdas ao fogo aproximadas aos valores encontrados nas análises gravimétricas. Trata-se de misturas de argilas quaternárias recentes, onde a caulinita mal cristalizada é o argilomineral predominante, apresentando também perda de água e matéria orgânica, confirmada pela análise química e pela difração de raios-X. Nota-se que tais resultados estão de acordo com os termogramas apresentados para as massas vermelhas utilizadas em confecção de blocos cerâmicos, segundo VIEIRA, HOLANDA e PINATTI (2000) e CAMPOS (2002).

4.1.5 – Difração de Raios-X (DR-X)

A Figura 4.3 ilustra os difratogramas de raios-X das massas industriais analisadas, apresentando as curvas das difrações de raios-X.

Para as amostras ensaiadas, verifica-se que, na amostra **A**, o difratograma registra presença de caulinita, caracterizada pelas distâncias interplanares de 8,47, 7,38, 4,54, 4,04, 3,72 e 3,57 Å; de feldspato, caracterizado por 3,21 e 3,19 Å; de mica/ililita caracterizadas por 10,02 Å; de mica, caracterizada por 10,02 e 3,20 Å; de montmorilonita, em menor quantidade, caracterizada por 14 Å; e de quartzo, caracterizado por 3,54 e 3,34 Å. Nota-se que não há registros de picos referentes ao teor de 4% do MgO, detectado nesta amostra, na análise química. Como mencionado na análise térmica, as amostras preparadas para o raio-X

também foram passadas em peneira 200, o que pode ter mascarado alguns minerais associados ao óxido de magnésio.

Na amostra **B**, o difratograma mostra a presença de caulinita, caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,20; 4,48 e 3,64 Å; de feldspato, caracterizado por 3,20 e 3,18 Å; de mica/ilita, caracterizadas por 10,40 Å; de mica, em menor quantidade, caracterizada por 3,20 Å; de montmorilonita, caracterizada por 14,35 Å; e de quartzo, caracterizado por 4,04, 3,52, 3,48 e 3,34 Å.

A amostra **C** apresenta o difratograma com a caulinita caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,20, 4,39, 4,02 e 3,57 Å; o feldspato, caracterizado por 3,20 e 3,18 Å; de mica/ilita caracterizada por 10,42 Å; a mica caracterizada por 10,32, 8,37, e 3,16 Å; em menor quantidade, de montmorilonita caracterizada por 14,35 Å; e o quartzo, caracterizado por 4,20, 3,36 e 3,33 Å.

Na amostra **D**, o difratograma registra a presença de caulinita, caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,27, 4,25, 3,66, 3,58 e 3,39 Å; o feldspato, caracterizado por 3,21 e 3,18 Å; de mica/ilita, caracterizadas por 10,03 Å; de mica, caracterizada por 7,49 e 2,99 Å; de montmorilonita, caracterizada por 14,34 Å; e de quartzo, caracterizado por 4,22 e 3,34 Å.

Finalmente, na amostra **E**, o difratograma mostra a presença de caulinita, caracterizada pelas distâncias interplanares de 7,46, 7,15, 4,19 e 4,04 Å; o feldspato, caracterizado por 3,19 e 3,15 Å; de mica, em maior quantidade, caracterizada por 9,97, 4,98, 3,76, 3,49, 3,40 e 2,99 Å; de montmorilonita, caracterizada por 14,35 Å; e de quartzo, caracterizado por 4,14 e 3,33 Å. Observa-se ainda que a caulinita, o feldspato, a mica e o quartzo, são os principais minerais acessórios presentes nas quatro primeiras amostras. Os picos de maior intensidade do quartzo indicam maior presença de sílica livre em todas as amostras analisadas. Esse resultado está de acordo com estudos já obtidos na literatura com massas industriais da Paraíba, realizados por CAMPOS (2002).

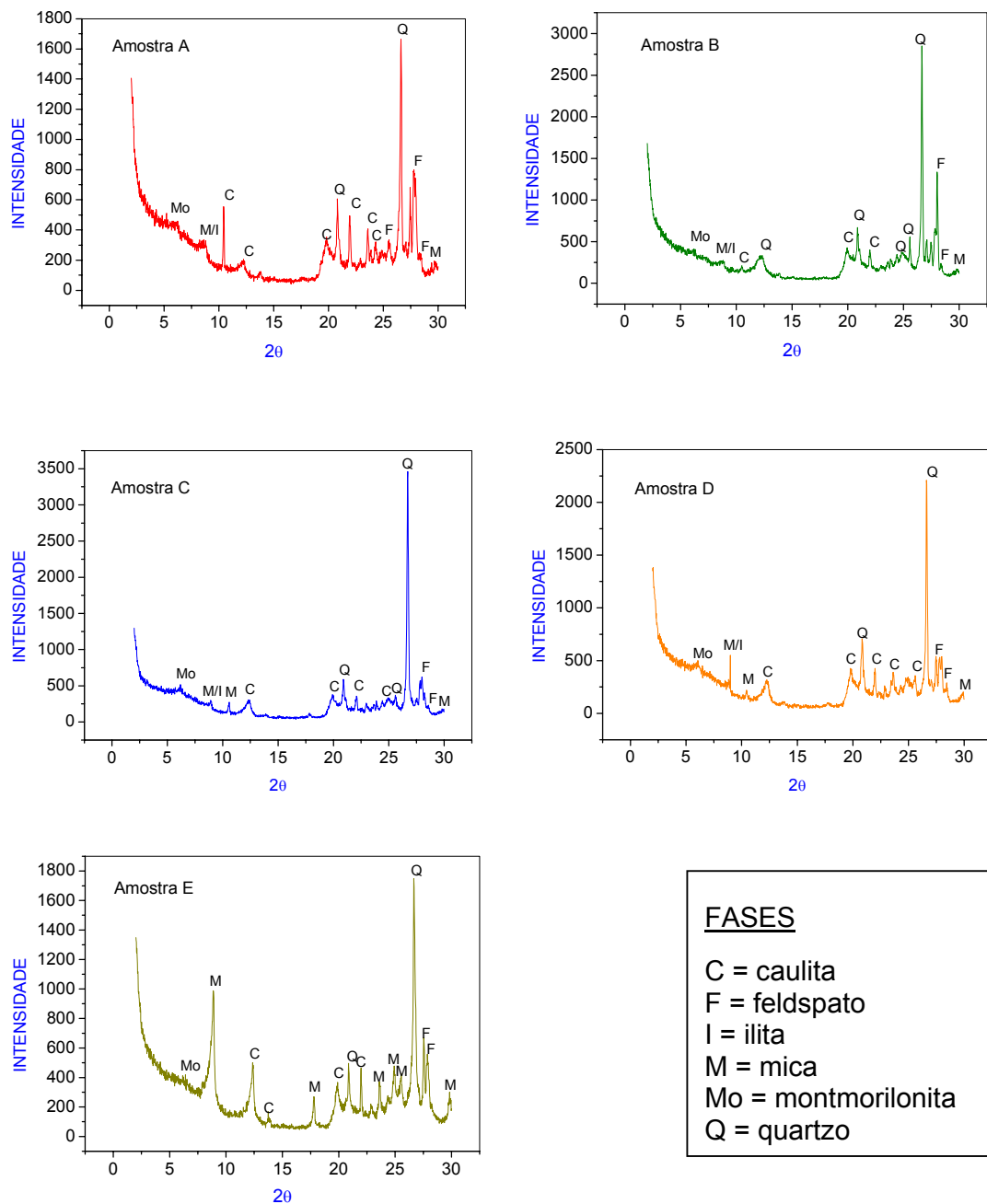


Figura 4.3: Difratoformas de raios-X das massas industriais.

4.2 – Caracterização Tecnológica Preliminar

4.2.1 – Conformação por prensagem

A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos ensaios realizados em corpos de prova processados por prensagem e por extrusão com as massas industriais, secos

a 110°C e queimados a 800, 900 e 1000°C. Nota-se que todas as amostras estudadas apresentaram a cor vermelha típica dos blocos cerâmicos, devido ao alto teor de ferro presente, a atmosfera oxidante do forno durante a queima, o que confirma seu uso na fabricação de blocos cerâmicos.

TABELA 4.4 - Cores das amostras de massa industrial para cerâmica vermelha, processadas por *prensagem* e *extrusão*, após tratamentos térmicos a 110°C, 800°C, 900°C e 1000°C.

AMOSTRAS	CORES APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS			
	110°C	800°C	900°C	1000°C
A	Cinza	Vermelho claro	Vermelho	Vermelho escuro
B	Cinza	Vermelho claro	Vermelho	Vermelho escuro
C	Cinza	Vermelho claro	Vermelho	Vermelho escuro
D	Cinza	Vermelho claro	Vermelho	Vermelho escuro
E	Cinza	Vermelho claro	Vermelho	Vermelho escuro

4.2.2 - Propriedades físico-mecânicas

A Figura 4.4, a seguir, e a Tabela 4.5 (Anexo I) apresentam os valores numéricos das propriedades físico-mecânicas resultantes dos ensaios realizados nos corpos de prova *processados por prensagem*, secos e submetidos à temperatura de 110°C. Observa-se que para a *umidade de prensagem*, obteve-se um valor máximo de $9,93 \pm 0,38\%$ (amostra **C**), o que é aproximadamente a metade do limite de plasticidade da massa original (Tabela 4.2), conforme dados teóricos. Para a *retração linear de secagem*, tem-se um valor máximo de $0,80 \pm 0,14\%$ (amostra **A**), o que satisfaz, pois é desejável que este valor não ultrapasse a 6% de retração. E para a *tensão de ruptura à flexão*, obteve-se um valor mínimo de $3,03 \pm 0,10$ MPa (amostra **D**), o que satisfaz, pois o valor mínimo especificado é de 2,50 MPa, segundo SOUZA SANTOS (1992). Nota-se que a amostra **C**, por apresentar um maior teor da fração argila, resultou em um maior valor para a tensão de ruptura à flexão, confirmando dados da literatura.

Em uma análise conjunta das propriedades físico-mecânicas das amostras de massas industriais ensaiadas e secas a 110°C, nota-se que as mesmas atendem aos valores de referência para massa cerâmica vermelha, segundo dados da literatura (VIEIRA, HOLANDA e PINATTI, 2000 e CAMPOS, 2002).

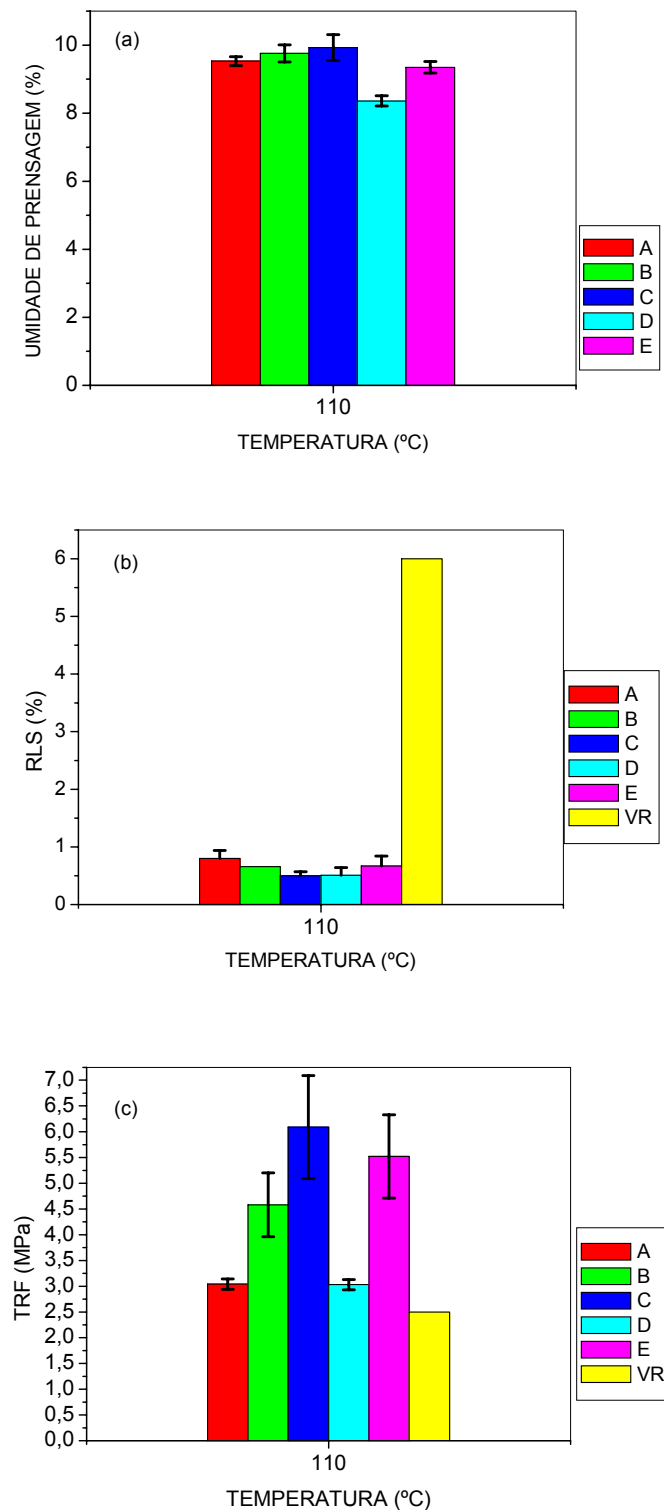


Figura 4.4: Gráficos das propriedades físico-mecânicas das amostras prensadas e secas a 110°C: (a) umidade de prensagem; (b) retração linear de secagem e (c) tensão de ruptura à flexão. VR = valor de referência.

A Figura 4.5 resultante da Tabela 4.6 (Anexo I), apresenta os gráficos das propriedades físico-mecânicas dos ensaios realizados nos corpos de prova processados por *prensagem* e sinterizados nas temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C. Devido ao grande número de dados obtidos, o que provocaria um grande número de gráficos, optou-se por só construir os referentes à absorção de água, à porosidade aparente e à tensão de ruptura à flexão. Portanto, verifica-se que as amostras analisadas apresentam valores máximos de *absorção de água* de $14,03 \pm 0,65\%$ (amostra **C**), na temperatura de 800°C, para um valor máximo de referência de 25% de absorção. Para a *porosidade aparente* registra-se um valor máximo de $27,03 \pm 0,88\%$ (amostra **C**), na temperatura de 800°C, tendo como referência o valor máximo de 35% de porosidade. Para *massa específica aparente*, o valor mínimo foi $1,93 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ (amostra **C**), na temperatura de 800°C, para um valor mínimo de referência, $1,70 \text{ g/cm}^3$ de massa específica. Para a *retração linear de queima*, o valor máximo foi $4,19 \pm 0,02\%$ (amostra **C**), na temperatura de 1000°C, e não há valor especificado na literatura consultada. Para a *perda ao fogo*, o valor máximo foi a $8,01 \pm 0,58\%$ (amostra **B**), na temperatura de 1000°C, também sem valor especificado na literatura consultada. E para a *tensão de ruptura à flexão*, o valor mínimo apresentado foi $5,52 \pm 0,92 \text{ MPa}$ (amostra **D**), na temperatura de 800°C, tomado como valor mínimo especificado 5,50 MPa.

A análise conjunta das propriedades físico-mecânicas dos ensaios preliminares, realizados nas amostras de massas plásticas vermelhas conformadas por *prensagem*, revela, no geral, que a amostra **C** apresentou os melhores resultados, salvo pequenas exceções, o que confirma o seu maior teor da fração argila registrado pela análise granulométrica, conforme Figura 4.1.

Verifica-se que existe uma relação coerente entre os valores crescentes da massa específica aparente com as reduções da porosidade aparente e da absorção de água, com o aumento da temperatura de queima. Este comportamento também foi observado por CAMPOS (2002), o que permite concluir que, no geral, as amostras estudadas são adequadas à confecção de blocos cerâmicos.

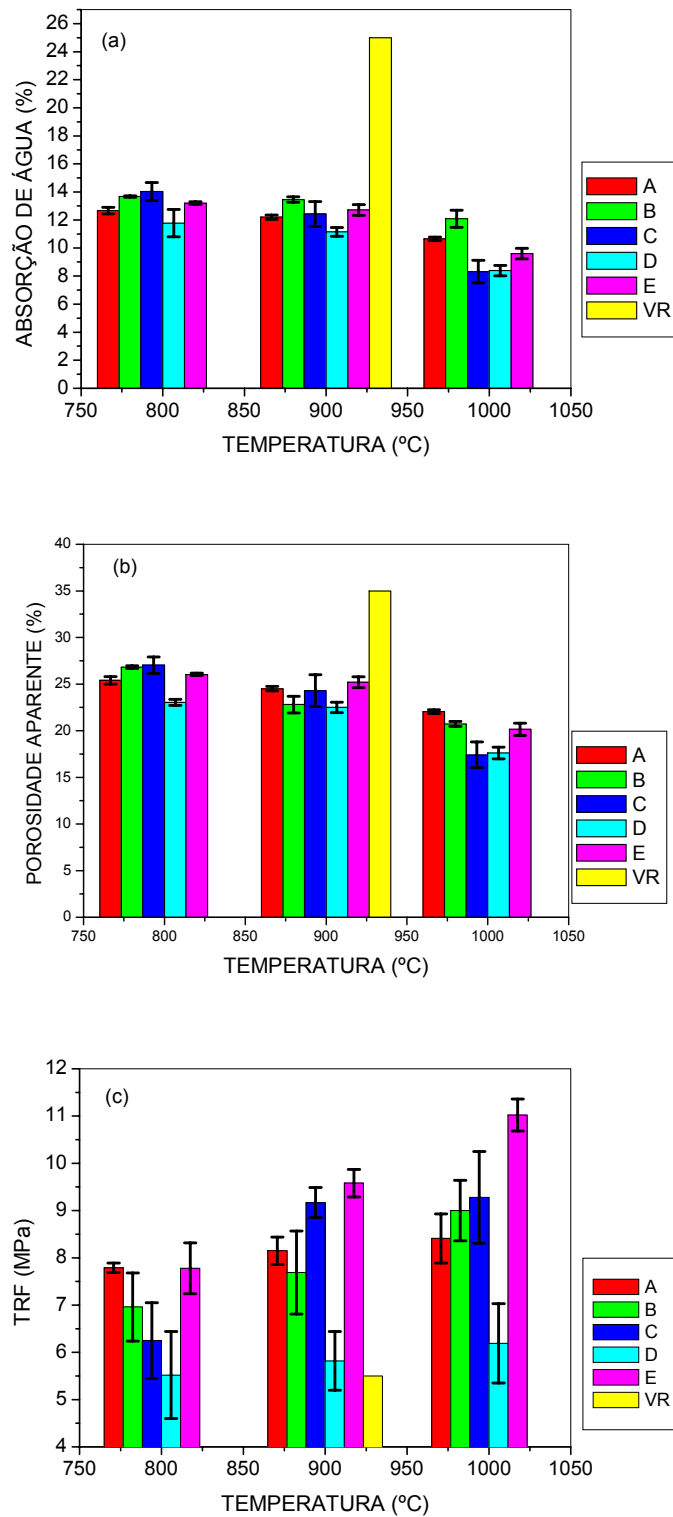


Figura 4.5: Gráficos das propriedades físico-mecânicas das amostras prensadas e sinterizadas: (a) absorção de água; (b) porosidade aparente e (c) tensão de ruptura à flexão. VR = valor de referência.

4.3 – Caracterização Tecnológica Completa

4.3.1 – Conformação por extrusão

As Tabelas 4.7 e 4.8 (Anexo I) apresentam os resultados dos ensaios realizados em corpos de prova conformados por extrusão, secos a 110°C e queimados a 800, a 900 e a 1000°C com as massas industriais.

4.3.2 – Propriedades físico-mecânicas

A Figura 4.6, a seguir, e a Tabela 4.7 (Anexo I) apresentam os valores numéricos das propriedades físico-mecânicas resultantes dos ensaios realizados nos corpos de prova *processados por extrusão* e secos à temperatura de 110°C. Observa-se que, para a *umidade de extrusão*, obteve-se um valor máximo de $20,27 \pm 0,28\%$ (amostra **E**), o valor teórico usual nas fábricas de blocos cerâmicos, é de 20% de umidade. Os dados de umidade de extrusão são muito próximos, o que é confirmado com os dados da umidade da unidade fabril, que forneceu as respectivas massas (Tabela 3.1), os quais foram usados para umidificar as massas para o processo de extrusão. Para a *retração linear de secagem*, tem-se um valor máximo de $5,63 \pm 0,21\%$ (amostra **A**), o que satisfaz, pois é desejável que este valor não ultrapasse a 6% de retração, mas observando que a amostra **A** e a **E**, apresentaram praticamente os mesmos resultados de análise granulométrica (ver Fig. 4.1). E para a *tensão de ruptura à flexão*, obteve-se um valor mínimo de $5,20 \pm 0,94$ MPa (amostra **A**), o que satisfaz, pois o valor mínimo especificado é de 2,50 MPa. Nota-se que a amostra **C**, apresenta o maior valor para a tensão de ruptura à flexão, o que era esperado, uma vez que ela apresentou o maior teor de fração argila e a amostra **A**, o maior teor da fração areia, confirmado pela análise granulométrica.

A análise conjunta das propriedades físico-mecânicas das amostras secas a 110°C, estudadas, mostra que as mesmas atendem aos valores especificados, com valores limites preconizados em laboratório para massas cerâmicas vermelhas por BARZAGHI e SALGE (1982) e por CAMPOS (2002), tomados como referências.

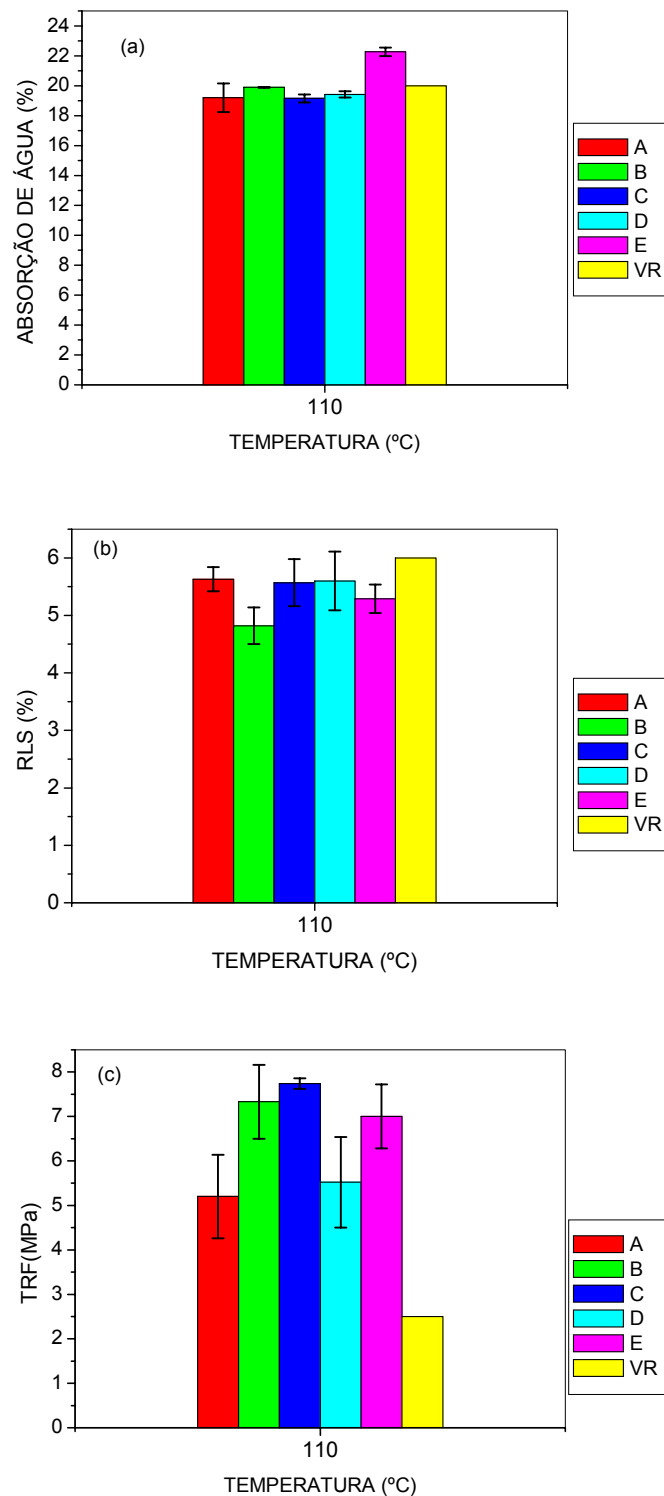


Figura 4.6: Gráficos das propriedades físico-mecânicas das amostras extrudadas e secas a 110°C: (a) umidade de extrusão; (b) retração linear de secagem e (c) tensão de ruptura à flexão. VR = valor de referência.

A Figura 4.7 e a Tabela 4.8 (Anexo I) apresentam os valores numéricos das propriedades físico-mecânicas resultantes dos ensaios cerâmicos, realizados nos corpos de prova processados por *extrusão* e sinterizados nas temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C. Devido ao grande número de dados, foram plotados os gráficos referentes à absorção de água, à porosidade aparente e à tensão de ruptura à flexão, por serem as propriedades físico-mecânicas mais requeridas na indústria de cerâmica vermelha. Analisando os citados dados, verifica-se que os mesmos apresentaram valores máximos de *absorção de água* de $16,63 \pm 0,31\%$ (amostra **E**), à temperatura de 800°C, tomado como referência o valor máximo de 25% de absorção. Para a *porosidade aparente*, registrou-se o valor máximo de $30,21 \pm 0,78\%$ (amostra **E**), à temperatura de 800°C, para o valor máximo de referência 35% de porosidade. Para *massa específica aparente*, o valor mínimo foi $1,82 \pm 0,04 \text{g/cm}^3$ (amostra **E**), à temperatura de 800°C, tomado como valor mínimo de referência $1,70 \text{g/cm}^3$ de massa específica. Para a *retração linear de queima*, o valor máximo foi $5,95 \pm 0,52\%$ (amostra **C**), à temperatura de 1000°C, sem valor especificado de referência na literatura consultada. Para a *perda ao fogo*, o valor máximo foi de $8,97 \pm 0,05\%$ (amostra **A**), à temperatura de 1000°C, também sem valor especificado na literatura consultada. Já para a *tensão de ruptura à flexão*, o valor mínimo encontrado foi $7,52 \pm 0,44 \text{MPa}$ (amostra **B**), à temperatura de 800°C, para um valor mínimo de referência de 5,50 MPa.

Determinadas as propriedades físico-mecânicas das amostras em estudo, em massa industrial com umidade próxima a da indústria cerâmica, conforme valores constantes na Tabela 4.8 e na Figura 4.7, verifica-se que os corpos cerâmicos estudados apresentaram resultados dentro da faixa de valores recomendados por BARZAGHI e SALGE (1982), para que uma massa cerâmica possa ser utilizada na fabricação de blocos cerâmicos por processo de extrusão. Observa-se ainda que a amostra **C**, apresentou os melhores resultados para a tensão de ruptura, o que é justificável por ser a amostra que apresentou o maior percentual de fração argila.

Observando as colunas dos gráficos da citada figura, nota-se que se manteve uma relação coerente entre os valores crescentes da massa específica aparente com as reduções da porosidade aparente e da absorção de água, com o aumento da temperatura de queima. Este comportamento também foi observado por CAMPOS (2002).

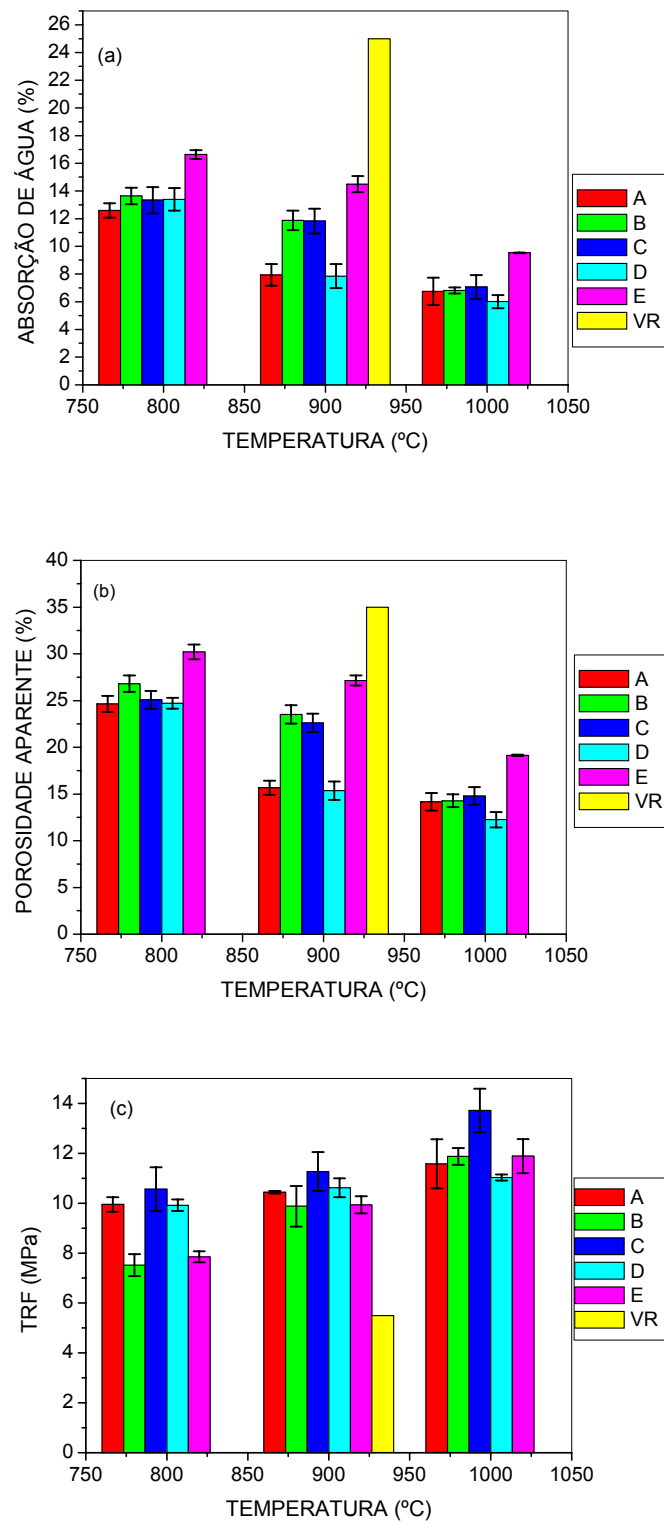


Figura 4.7: Gráficos das propriedades físico-mecânicas selecionadas das amostras extrudadas e sinterizadas: (a) absorção de água; (b) porosidade aparente e (c) tensão de ruptura à flexão. VR = valor de referência.

4.4 – Conclusões Parciais

Após a análise e a discussão dos resultados dos ensaios das caracterizações físicas, mineralógicas e tecnológicas, podem ser levantadas as seguintes conclusões parciais:

4.4.1 – Ensaio de caracterização física e mineralógica

Com base nos resultados obtidos nos ensaios da caracterização física das massas plásticas industriais estudadas, pode-se concluir que:

a) com base nos resultados dos ensaios da análise granulométrica por difração a laser, as amostras apresentaram uma pequena faixa de teores para a fração argila e altos teores para as frações silte e areia;

b) os valores numéricos das características de plasticidade das massas plásticas na sua forma industrial (*sem aditivos químicos*), ensaiadas pelo método de Casagrande, mostram que os resultados estão na faixa de valores aceitáveis para massas industriais usadas em cerâmica vermelha, moldadas pelo processo de extrusão com LP de 15 a 25% e IP de 10 a 35%, segundo VIEIRA, HOLANDA e PINATTI (2000);

c) com base nos resultados da análise química, nota-se que as amostras apresentam certas semelhanças em suas composições químicas, podendo ser classificadas como amostras de origem quaternárias recentes, onde a caulinita é o argilomineral predominante, apresentando também matéria orgânica, feldspato, mica/ilita e quartzo, além de teor de ferro acima de 5%, responsável pela cor vermelha dos produtos de cerâmica vermelha, com resultados numéricos dentro da média de valores das massas para cerâmica vermelha da Paraíba, estudadas por CAMPOS (2002);

d) as curvas de análises térmicas das cinco amostras analisadas estão de acordo com os termogramas apresentados para massas cerâmicas vermelhas, estudadas por VIEIRA, HOLANDA e PINATTI (2000), o que foi

também observado em estudos realizados com massas cerâmicas das mesmas bacias hidrográficas das citadas amostras (CAMPOS, 2002);

e) os difratogramas de raios-X registram com mais intensidade a presença das fases caulinita, feldspato, mica e quartzo, este apresentando os picos de maior intensidade indicando a maior presença de sílica livre em todas as amostras, onde se observa a semelhança existente entre a composição qualitativa mineralógica das amostras analisadas, confirmados pelos ensaios de análise química e análises térmicas, o que é similar a estudos já realizados com este tipo de matéria-prima na Paraíba (CAMPOS, 2002).

f) analisando conjuntamente os resultados da caracterização física, observa-se que a análise química da amostra **A**, apresenta um alto teor de MgO (óxido de magnésio), o qual não foi encontrado na análise térmica nem no difratograma de raios X da citada amostra. Tal fenômeno é justificado em função do material usado na análise química ter sido passado 100% em peneira ABNT nº. 100 (0,149 mm), enquanto que nos ensaios de ATD e raios X as amostras foram preparadas com material passado 100% em peneira ABNT nº. 200 (0,074 mm), o que possivelmente reteve os minerais que contêm o MgO, não sendo registrados no termograma nem no difratograma da amostra **A**.

4.4.2 – Caracterização tecnológica

Com base nos resultados obtidos nos ensaios preliminares das massas plásticas industriais pela comparação dos valores das propriedades físico-mecânicas, conclui-se que:

a) observando as informações dos ensaios tecnológicos das amostras (*moldadas por prensagem e por extrusão*), quanto ao critério da cor, todas as amostras analisadas apresentam a cor vermelha típica dos blocos cerâmicos, devido ao alto teor de ferro presente, conforme a análise química das amostras estudadas;

b) analisando os valores numéricos dos ensaios preliminares das amostras (*moldadas por prensagem*), após tratamentos térmicos nas temperaturas de 110, 800, 900 e 1000°C, verifica-se que após comparação com os valores mínimos de referências, todas as amostras estudadas confirmam seu uso na fabricação de blocos cerâmicos;

c) quanto às propriedades físico-mecânicas das amostras ensaiadas em corpos de prova de dimensões (10,0 x 2,0 x 1,0) cm³, processados por *extrusão*, por comparação com valores limites de referências, e considerando a temperatura de 900°C, por ser a temperatura usual de queima de materiais de construção, conclui-se, no geral, que as amostras estudadas são adequadas à confecção de blocos cerâmicos, fato que foi estabelecido pelo método preliminar e confirmado pelos ensaios completos, com um mínimo de trincas e empenamentos, segundo BARZAGHI e SALGE (1982), observados ao olho nu.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE OS ENSAIOS TECNOLÓGICOS COM AS MASSAS ADITIVADAS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios das características de plasticidade e das propriedades físico-mecânicas, realizados com as massas aditivadas. No final, são apresentadas as conclusões parciais.

5.1 – Índices de Atterberg

Os ensaios de plasticidade constaram da determinação dos índices de Atterberg (LL, LP e IP), das amostras de massas plásticas tratadas com os dez aditivos químicos nos teores de 0,5; 1,0 e 1,5% de aditivo por 100g de massa seca. Os resultados obtidos estão agrupados nas Figuras de 5.1 a 5.5, resultantes da Tabela 4.2 e das Tabelas de 5.1 a 5.5 (Anexo I), onde constam os resultados dos ensaios de plasticidade para cada amostra de massa plástica aditivada nas diversas proporções.

As Figuras de 5.1 a 5.5 apresentam a variação das características de plasticidade em função da concentração de aditivos referentes às amostras de massas plásticas **A**, **B**, **C**, **D** e **E**, respectivamente aditivadas nas proporções citadas.

Analisando os valores dos índices de Atterberg, segundo as curvas constantes nestas figuras nota-se que não houve grandes variações, em relação aos resultados dos ensaios das características de plasticidade, sem a incorporação de aditivos químicos, exceto para os dados resultantes do ensaio com o aditivo A5, CMC, nas diversas proporções, uma vez que a curva formada por este aditivo não obedece a nenhuma lei de formação, em relação aos demais aditivos utilizados nesta pesquisa. Tal comportamento é provavelmente porque o carboximetilcelulose (CMC) não possui características reológicas adequadas ao processo de extrusão de massas plásticas vermelhas, conforme a literatura consultada (ONODA e HENCH, 1978).

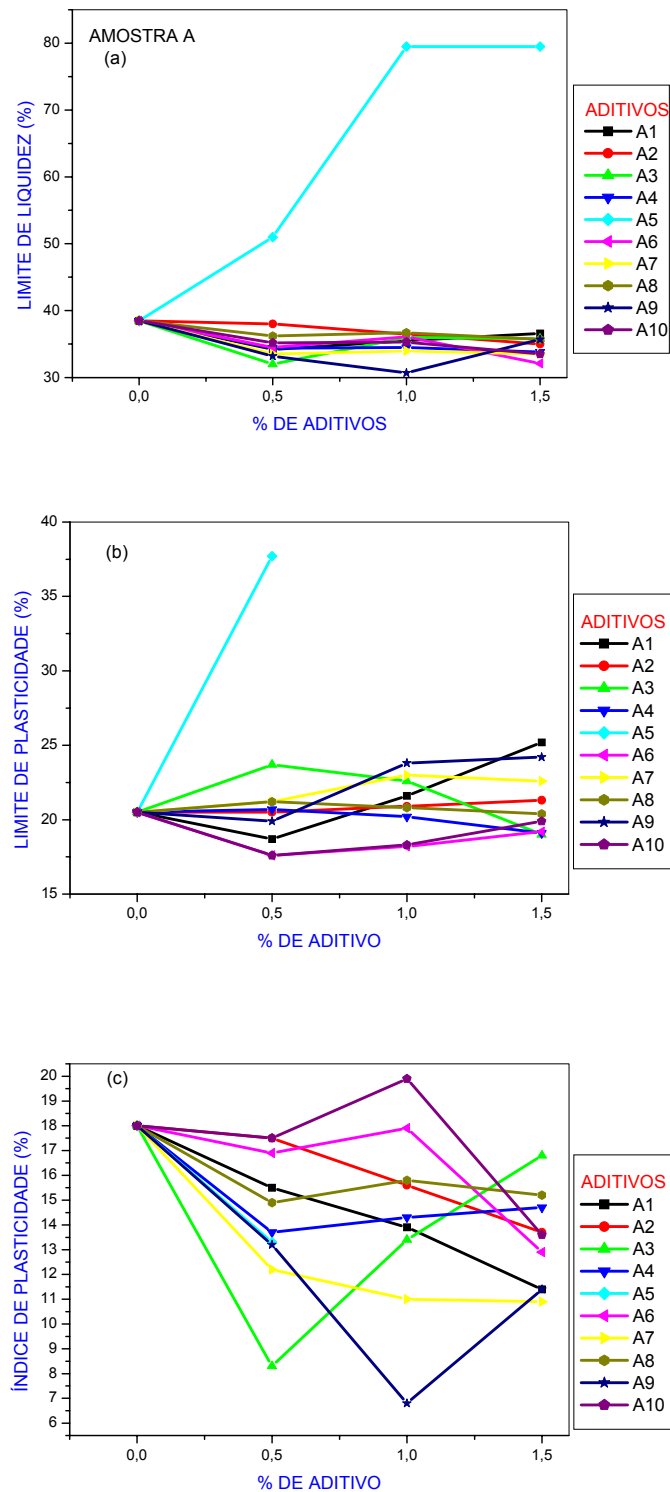


Figura 5.1: Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra **A**: (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.

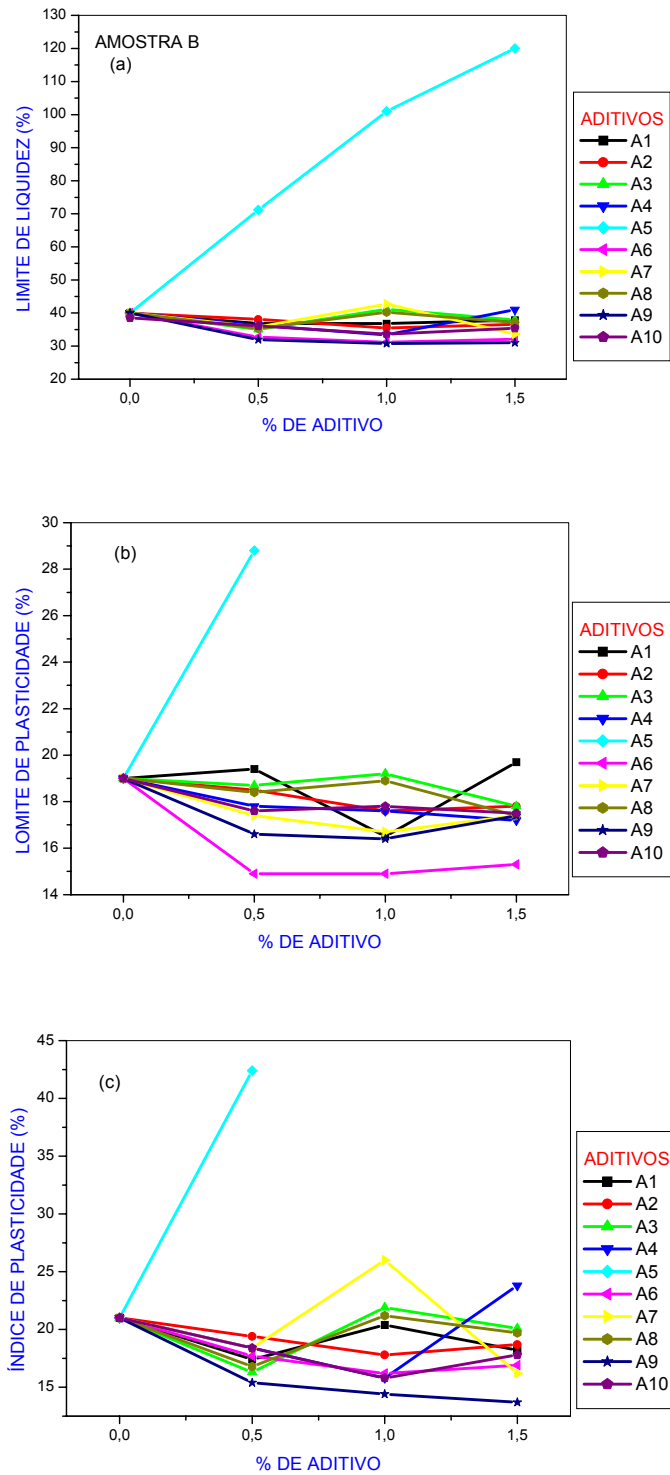


Figura 5.2: Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra **B**: (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.

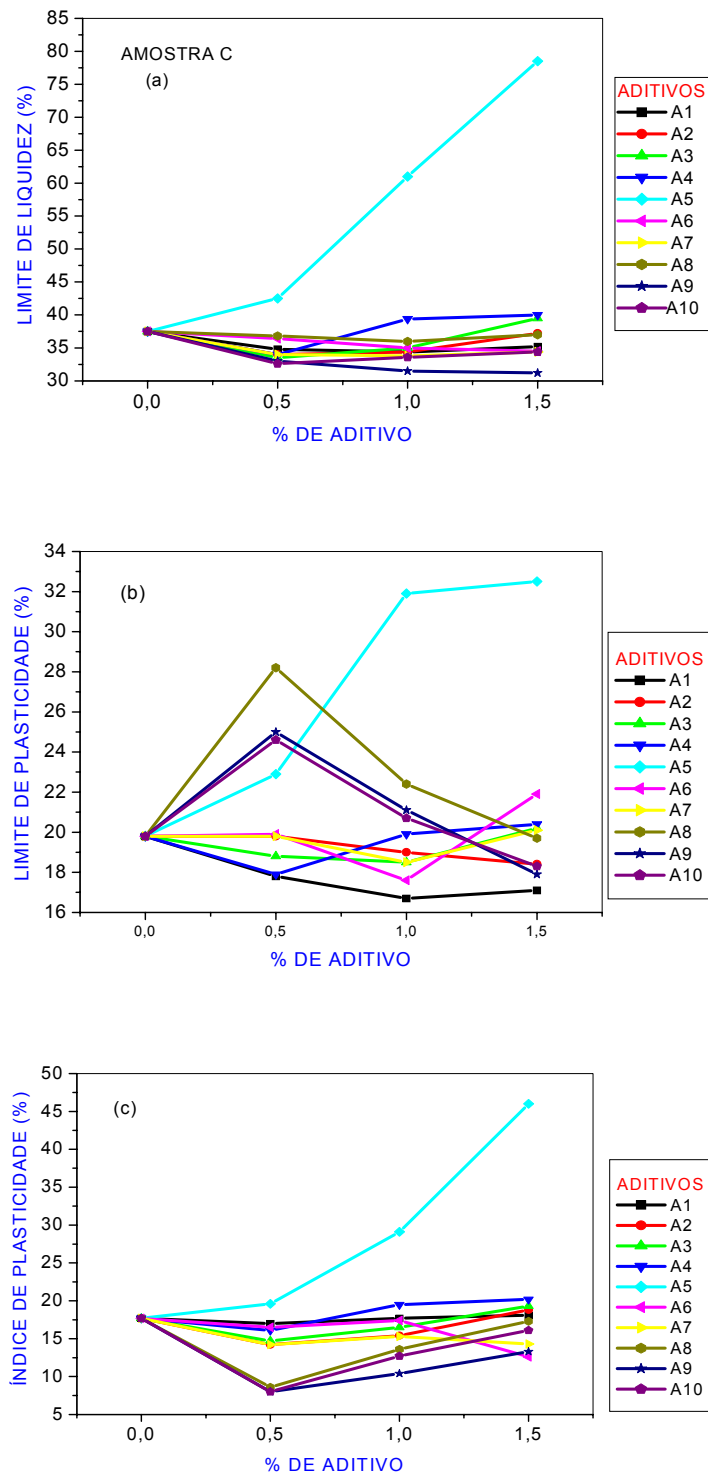


Figura 5.3: Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra **C**: (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.

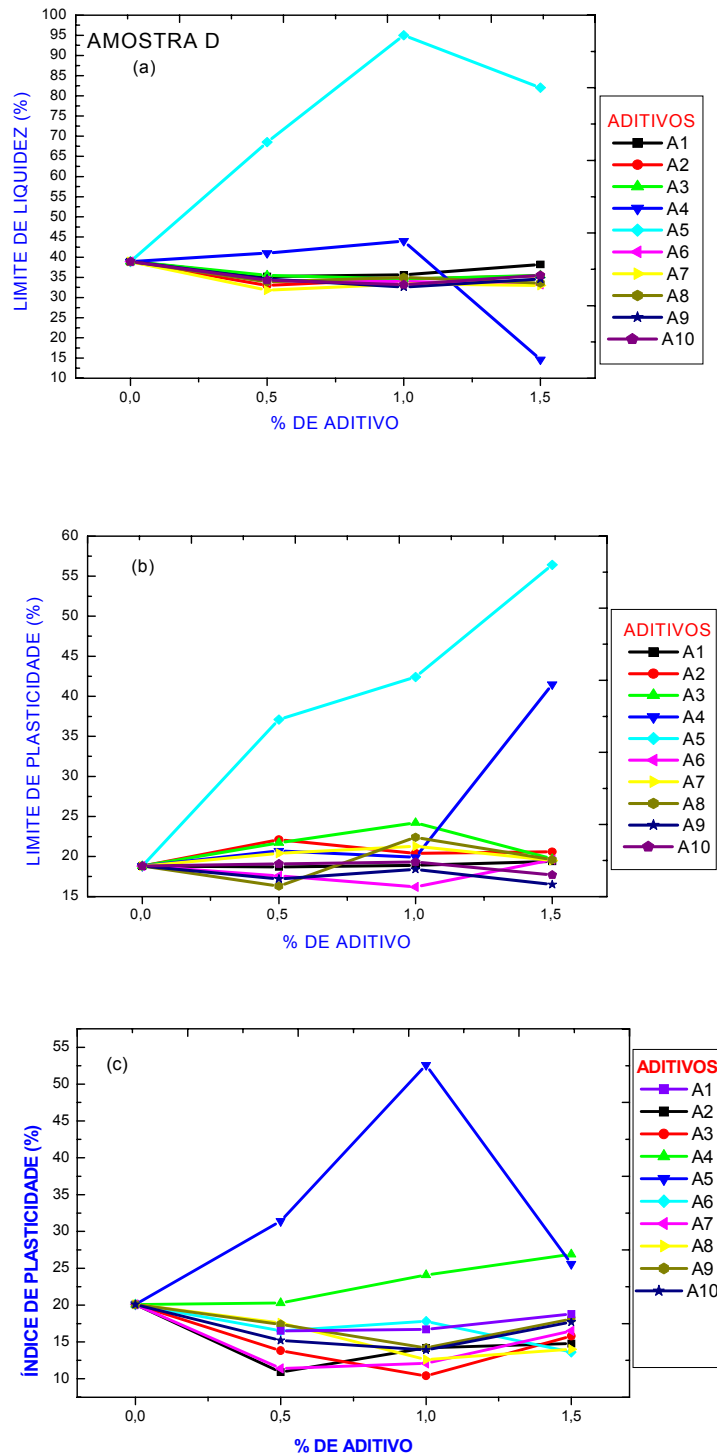


Figura 5.4: Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra **D**: (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.

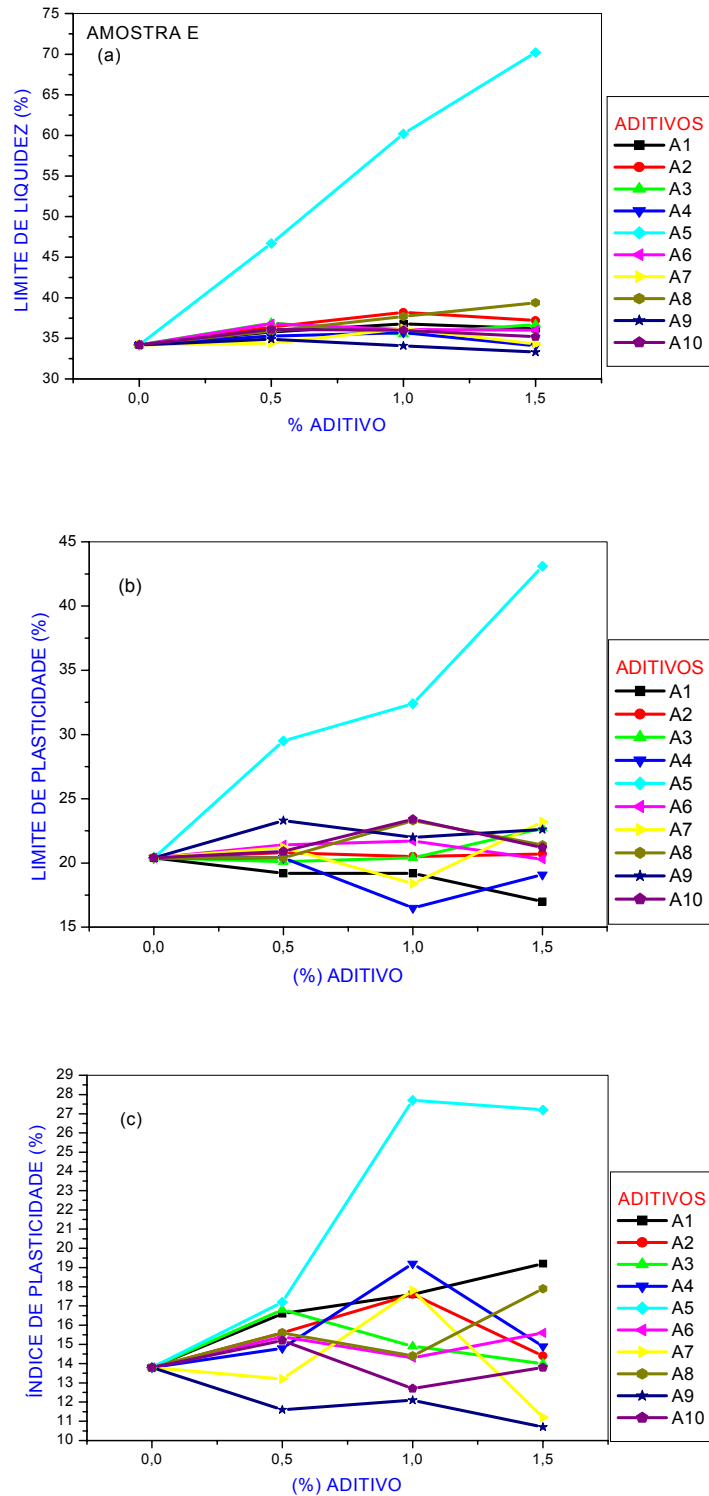


Figura 5.5: Gráficos das características de plasticidade com a massa aditivada da amostra **E**: (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade e (c) índice de plasticidade.

O estudo da plasticidade das massas cerâmicas tratadas com aditivos teve como objetivo reduzir os valores do limite plasticidade dessas massas argilosas, procurando manter a mesma extrudabilidade da massa original. Portanto, se faz necessário realizar alguns cálculos, visando obter dado o mais próximo possível da umidade usada na indústria cerâmica que forneceu o material em análise. Foi adotada a diferença entre o valor do limite de plasticidade da massa industrial (*sem aditivos*) e o seu valor para a massa aditivada (*diferença esta representada por \bullet LP*), o que resultou tanto no sentido de redução como no de aumento do LP. Os valores dessa diferença (\bullet LP) serão calculados de forma que uma redução no LP (*por indicar uma variação desejável no mesmo*) resultará num número positivo, e um aumento no LP (*por indicar uma variação indesejável*) resultará num número negativo.

Portanto, segundo a convenção adotada, as diferenças no valor do limite de plasticidade serão calculadas com base na equação (2), abaixo, usando os valores do LP da Tabela 4.2 e das Tabelas de 5.1 a 5.5, desta tese.

$$\bullet LP = LP1(\text{massa industrial}) - LP2(\text{massa aditivada}) \quad (2)$$

Efetuada os cálculos para o LP da amostra **A**, usando os valores constantes nas Tabelas 4.2 e 5.1, verifica-se que a variação do limite de plasticidade foi positiva (*considerando apenas a maior diferença entre as três frações da porcentagem de aditivo*) para os aditivos A1, A6, A9 e A10 (a **0,5%**); A6 e A10 (a **1,0%**); A3, A4, A6, A7 e A10 (a **1,5%**). Logo, sete dos dez aditivos usados atendem ao critério adotado, segundo SALOMÃO (1975).

Efetuada os cálculos para o LP da amostra **B**, usando os dados constantes nas Tabelas 4.2 e 5.2, verifica-se que a variação do limite de plasticidade foi positiva (*considerando apenas a maior diferença entre as três frações da porcentagem de aditivo*) para os aditivos A2, A3, A4, A6, A7, A8, A9 e A10 (a **0,5%**); A1, A2, A4, A6, A7, A8, A9 e A10 (a **1,0%**), A2, A3, A4, A6, A7, A8, A9 e A10 (a **1,5%**), onde nove aditivos usados atendem ao critério adotado anteriormente.

E para os cálculos do LP da amostra **C**, usando os dados constantes nas Tabelas 4.2 e 5.3, e adotando os mesmos critérios, verifica-se que a variação do limite de plasticidade foi positiva para os aditivos A1, A3 e A4 (a **0,5%**); A1, A2, A3,

A6 e A7 (a **1,0%**), A1, A2, A8, A9 e A10 (a **1,5%**). Logo, nove dos dez aditivos usados atendem ao critério adotado, segundo SALOMÃO (1975).

Para a amostra **D**, usando os valores constantes nas Tabelas 4.2 e 5.4, verifica-se que a variação do limite de plasticidade foi positiva para os aditivos A1, A6, A8 e A9 (a **0,5%**); A6 e A9 (a **1,0%**); A9 e A10 (a **1,5%**). Portanto, cinco dos dez aditivos usados atendem ao critério adotado por SALOMÃO (1975).

E finalmente para a amostra **E**, usando os valores constantes nas Tabelas 4.2 e 5.5, verifica-se que a variação do limite de plasticidade foi positiva para os aditivos A4 (a **1,0%**) e A1 (a **1,5%**). Portanto, apenas dois dos dez aditivos usados atendem o critério adotado.

Na Tabela 5.6 consta o resumo do efeito dos aditivos no limite de plasticidade, descritos anteriormente, onde se observam detalhadamente os aditivos que aumentaram (A), isto é, os que tornam as massas mais plásticas, sendo necessário adicionar mais água para se obter o estado “mais plástico”. Os aditivos que baixaram (B) o limite de plasticidade com intensidades diferentes nas cinco amostras estudadas, certamente causarão uma economia de energia na secagem dos produtos cerâmicos.

TABELA 5.6 – Resumo do efeito dos aditivos no limite de plasticidade.

ADI-TIVO	AMOSTRA A			AMOSTRA B			AMOSTRA C			AMOSTRA D			AMOSTRA E		
	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
A1	B	A	A	A	B	A	B	B	B	I	I	A	A	A	B
A2	I	A	A	B	B	B	I	B	B	A	A	A	A	A	A
A3	A	A	B	B	I	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A
A4	I	B	B	B	B	B	B	I	A	A	A	A	A	B	A
A5	A	N	N	A	N	N	A	A	A	A	A	A	A	A	A
A6	B	B	B	B	B	B	I	B	A	B	B	A	A	A	A
A7	A	A	A	B	B	B	I	B	A	A	A	A	A	A	A
A8	A	A	I	B	B	B	A	A	I	B	A	A	A	A	A
A9	B	A	A	B	B	B	A	A	B	B	B	B	A	A	A
A10	B	B	B	B	B	B	A	A	B	A	A	B	A	A	A

A = aumentou o LP; B = baixou o LP e I = insignificante a alteração do limite de plasticidade e N = não determinado.

A Tabela 5.7, a seguir, apresenta o resumo das substâncias químicas que mais baixaram o limite de plasticidade, por amostra e os respectivos teores usados, onde se observam os aditivos mais eficientes para diminuir este índice de plasticidade que são: para amostra **A**, foram o cloreto de magnésio e o silicato de

sódio a 0,5% que causaram uma redução no limite de plasticidade de 14,14% em relação à massa não tratada. Para a amostra **B**, foi o cloreto de magnésio a 0,5% que causou uma redução de 21,57% no limite de plasticidade em relação à massa original. Para amostra **C**, foi o amido solúvel a 1,0% que causou uma redução de 15,65% no limite de plasticidade em relação à mesma amostra sem tratamento químico. Já para amostra **D**, foi o cloreto de magnésio a 1,0% que causou uma redução de 13,82% no limite de plasticidade em relação a essa amostra não tratada. Finalmente para amostra **E** foi o carbonato de sódio a 1,0% que causou uma redução de 16,77% no limite de plasticidade em relação à amostra original sem o devido tratamento químico. Portanto, observa-se que a incorporação de aditivos químicos em proporções de 0,5 a 1,5% reduz o limite de plasticidade, conseqüentemente causando uma redução na água de extrusão, durante o processamento de materiais cerâmicos.

TABELA 5.7 – Substâncias químicas e teores que provocaram as alterações mais significantes no limite de plasticidade.

AMOSTRAS	LPO%	SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS
A	20,5	LP com 0,5% de amido solúvel = 18,7% LP com 0,5% de cloreto de magnésio = 17,6% LP com 0,5% de hexametáfosfato de sódio = 19,9% LP com 0,5% de silicato de sódio = 17,6%
B	19,0	LP com 1,0% de amido solúvel = 16,5% LP com 0,5% de cloreto de magnésio = 14,9% LP com 1,0% de hexametáfosfato de sódio = 16,4% LP com 1,5% de silicato de sódio = 17,5%
C	19,8	LP com 1,0% de amido solúvel = 16,7% LP com 0,5% de carbonato de sódio = 17,9% LP com 1,0% de cloreto de magnésio = 17,6% LP com 1,5% de hexametáfosfato de sódio = 17,9% LP com 1,5% de silicato de sódio = 18,3%
D	18,8	LP com 1,0% de cloreto de magnésio = 16,2% LP com 1,5% de hexametáfosfato de sódio = 16,5% LP com 1,5% de silicato de sódio = 17,7%
E	17,7	LP com 1,5% de amido solúvel = 17,0% LP com 1,0% de carbonato de sódio = 16,5%

LPO = limite de plasticidade da massa original (sem aditivo).

Ao relacionar os valores numéricos do limite de plasticidade das amostras industriais analisadas, com a forma aditivada, nota-se que todos os aditivos usados alteraram o valor do LP das amostras, considerando a variação da percentagem de aditivo adotada; e que os valores foram próximos, exceto o aditivo A5, que

apresentou grandes variações para o LP, em todas as amostras, provavelmente por não possuir uma reologia adequada para trabalhar como mistura pó-ligante, necessária ao método de ensaio das características de plasticidade, adotado nesta pesquisa, que é o modelo de Casagrande. As tendências observadas na interação físico-química de cada aditivo estudado com as massas cerâmicas, são de justificativa teórica, extremamente difícil, em virtude da complexa mineralogia e das propriedades físicas de cada uma das amostras estudadas. Logo, torna-se difícil fazer uma análise específica do comportamento de cada aditivo, em virtude da elevada complexidade da composição mineralógica das massas estudadas, ficando impossível estabelecer um estudo fenomenológico das relações causa/efeito, que possa justificar adequadamente o mecanismo de ação de cada aditivo considerado. Ou seja, dada uma amostra de massa plástica e um aditivo (orgânico ou inorgânico), há necessidade de um estudo reológico experimental, para que se determine a influência da viscosidade do aditivo nas propriedades físicas e mecânicas da mesma. Portanto, a impossibilidade de explicação do mecanismo de ação dos aditivos em massa cerâmica vermelha, se deve à complexa mineralogia da argila vermelha: cada amostra apresenta uma composição mineralógica diferente, isto é, cada argila é um caso novo a ser estudado frente ao efeito do aditivo no limite de plasticidade, conforme estudos realizados por RAWET e SOUZA SANTOS (1980).

5.2 – Conformação por extrusão

As Tabelas de 5.8 a 5.12 (Anexo I) apresentam os resultados dos ensaios realizados em corpos de prova conformados por extrusão, secos a 110°C e queimados a 800, a 900 e a 1000°C com as massas aditivadas, com apenas cinco aditivos que mais baixaram o limite de plasticidade, o que resultou em melhores propriedades físico-mecânicas. Os aditivos usados foram os seguintes com seus respectivos teores:

- Amostra **A**: 0,5%A1; 0,5%A6; 0,5%A9 e 0,5%A10.
- Amostra **B**: 1,0%A1; 0,5%A6; 1,0%A9 e 1,5%A10.
- Amostra **C**: 1,0%A1; 0,5%A4; 1,0%A6; 1,5%A9 e 1,5%A10.
- Amostra **D**: 1,0%A6; 1,5%A9 e 1,5%A10.
- Amostra **E**: 1,5%A1 e 1,5%A4.

5.3 – Propriedades físico-mecânicas

As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, a seguir, e a Tabela 5.8 (Anexo I) apresentam os gráficos por amostra com os valores numéricos resultantes dos ensaios realizados nos corpos de prova confeccionados com as massas aditivadas *processados por extrusão* e secos à temperatura de 110°C.

Observando os gráficos da Figura 5.6, nota-se que a *umidade de extrusão*, variou de um valor mínimo $15,26 \pm 0,17\%$ (amostra **E**) com 1,5%A1 a um valor máximo de $18,81 \pm 0,02\%$ (amostra **C**) com 1,5%A9, o que satisfaz, pois normalmente as respectivas fábricas trabalham com 20% de umidade de extrusão (ver Tab. 3.1). Verifica-se a predominância da amostra **C**, por ser a que apresentou o maior teor da fração argila, logo é a mais plástica, entre as demais amostras analisadas, necessitando de uma maior quantidade de água de extrusão.

TABELA 5.9 – Redução na água de extrusão provocada pelo uso dos aditivos.

AMOSTRAS	TEOR DE ADITIVO USADO	UMIDADE DE EXTRUSÃO DA MI (%)	UMIDADE DE EXTRUSÃO DA MA (%)	REDUÇÃO NA ÁGUA DE EXTRUSÃO (%)
A	0,5%A1	19,20	17,71	7,76
	0,5%A6		15,30	20,31
	0,5%A9		17,97	6,40
	0,5%A10		16,39	14,64
B	1%A1	19,89	17,92	9,90
	0,5%A6		16,47	17,19
	1%A9		16,32	17,94
	1,5%A10		16,94	14,83
C	1%A1	19,15	17,89	6,58
	0,5%A4		18,32	4,33
	1%A6		16,10	15,92
	1,5%A9		18,81	1,77
	1,5%A10		18,20	4,96
D	1%A6	19,42	16,54	14,83
	1,5%A9		18,46	4,94
	1,5%A10		18,74	3,50
E	1,5%A1	20,27	15,26	24,72
	1%A4		16,81	17,06

MI – massa industrial e MA – massa aditivada

A Tabela 5.9 apresenta dados de redução da água de extrusão causada pelo uso dos aditivos que mais baixaram o LP, conseqüentemente, os que mais

reduziram a água de extrusão, durante o processamento dos corpos de prova. Observa-se na citada tabela que o uso do *amido solúvel a 1,5%* na amostra **E**, causou uma redução de 24,72% na água de extrusão, o que certamente acarretará um menor gasto de energia na secagem de blocos cerâmicos, tornando o processo mais econômico.

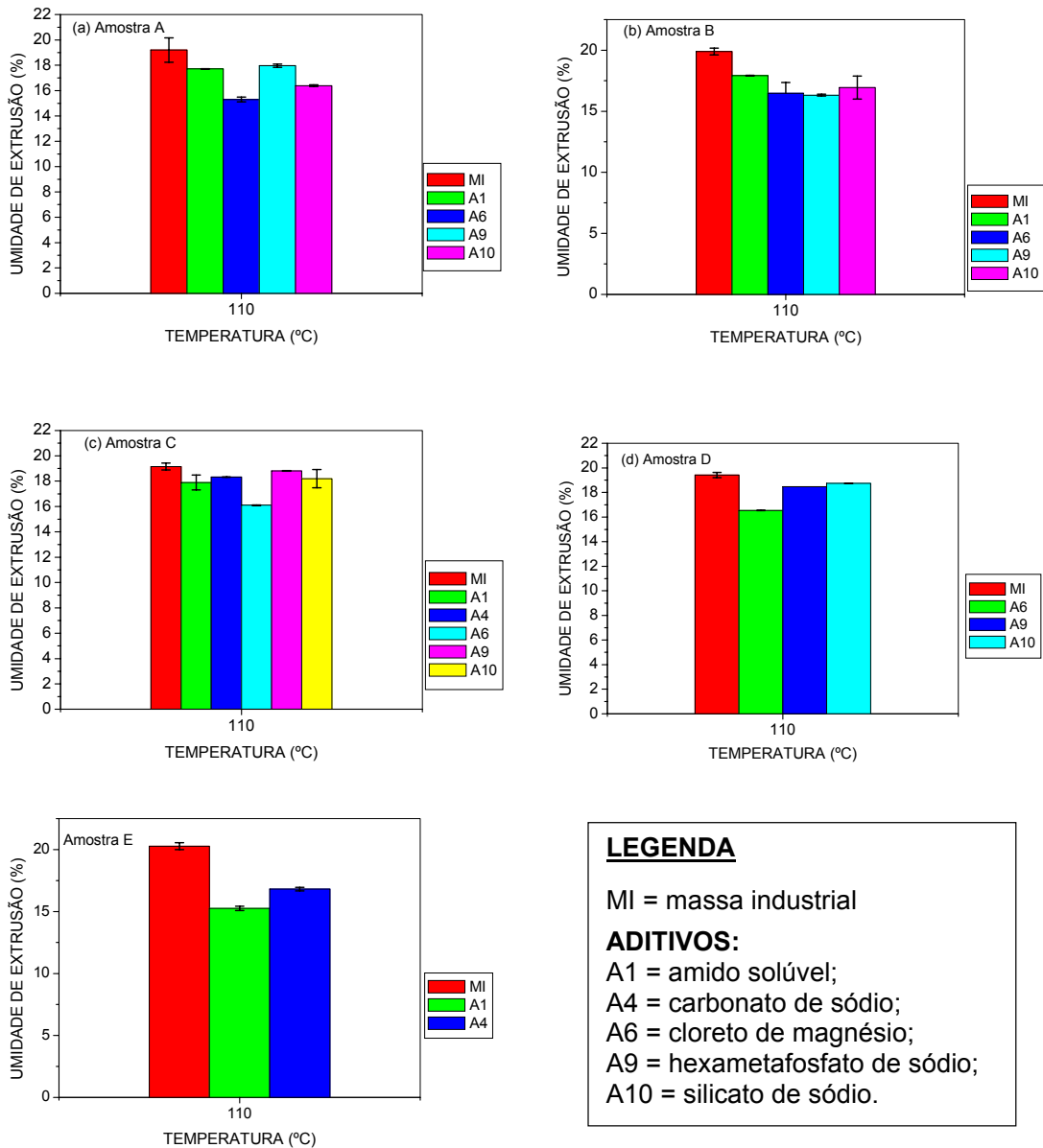


Figura 5.6: Umidade de extrusão das amostras aditivadas e industriais, secas a 110°C: (a) amostra **A**; (b) amostra **B**; (c) amostra **C**; (d) amostra **D** e (e) amostra **E**.

Verificando os gráficos da Figura 5.7 referente à *retração linear de secagem*, nota-se que o resultado variou de um valor mínimo $3,22 \pm 0,22\%$ (amostra **B**) com 1%A9 a um valor máximo de $6,31 \pm 0,42\%$ (amostra **A**) com 0,5%A1, o que satisfaz, pois é desejável que este valor não ultrapasse a 10% de retração.

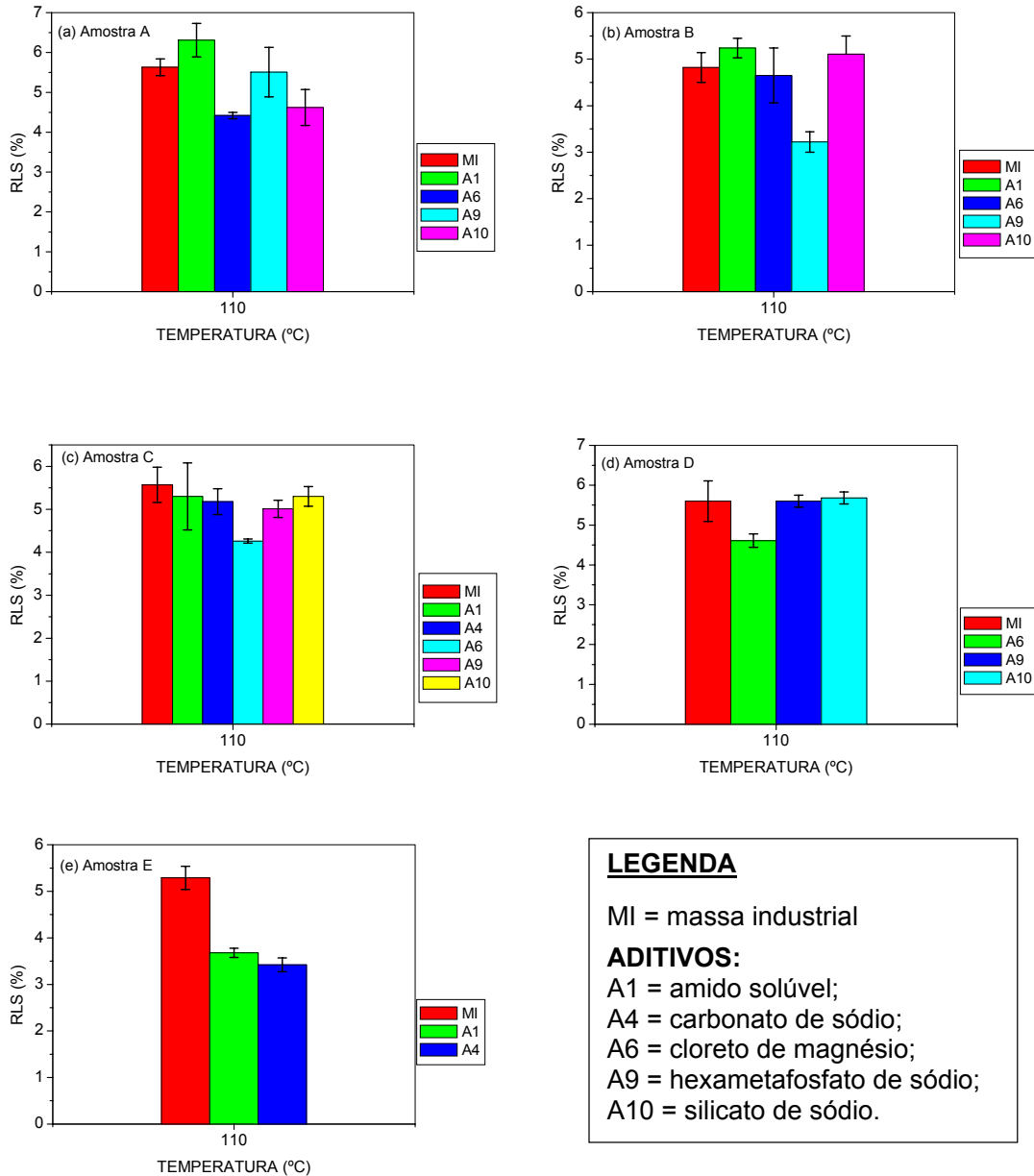


Figura 5.7: Retração Linear de Secagem das amostras aditivadas e industriais, secas a 110°C: (a) amostra **A**; (b) amostra **B**; (c) amostra **C**; (d) amostra **D** e (e) amostra **E**.

Os gráficos da Figura 5.8 referentes à *tensão de ruptura à flexão*, apresentam uma faixa de valor que variou de um mínimo de $3,52 \pm 0,24\%$ (amostra **C**) com 1%A6 a um valor máximo de $11,55 \pm 1,09$ MPa (amostra **E**) com 1,0%A4, o que satisfaz, pois o valor mínimo especificado é de 2,50 MPa.

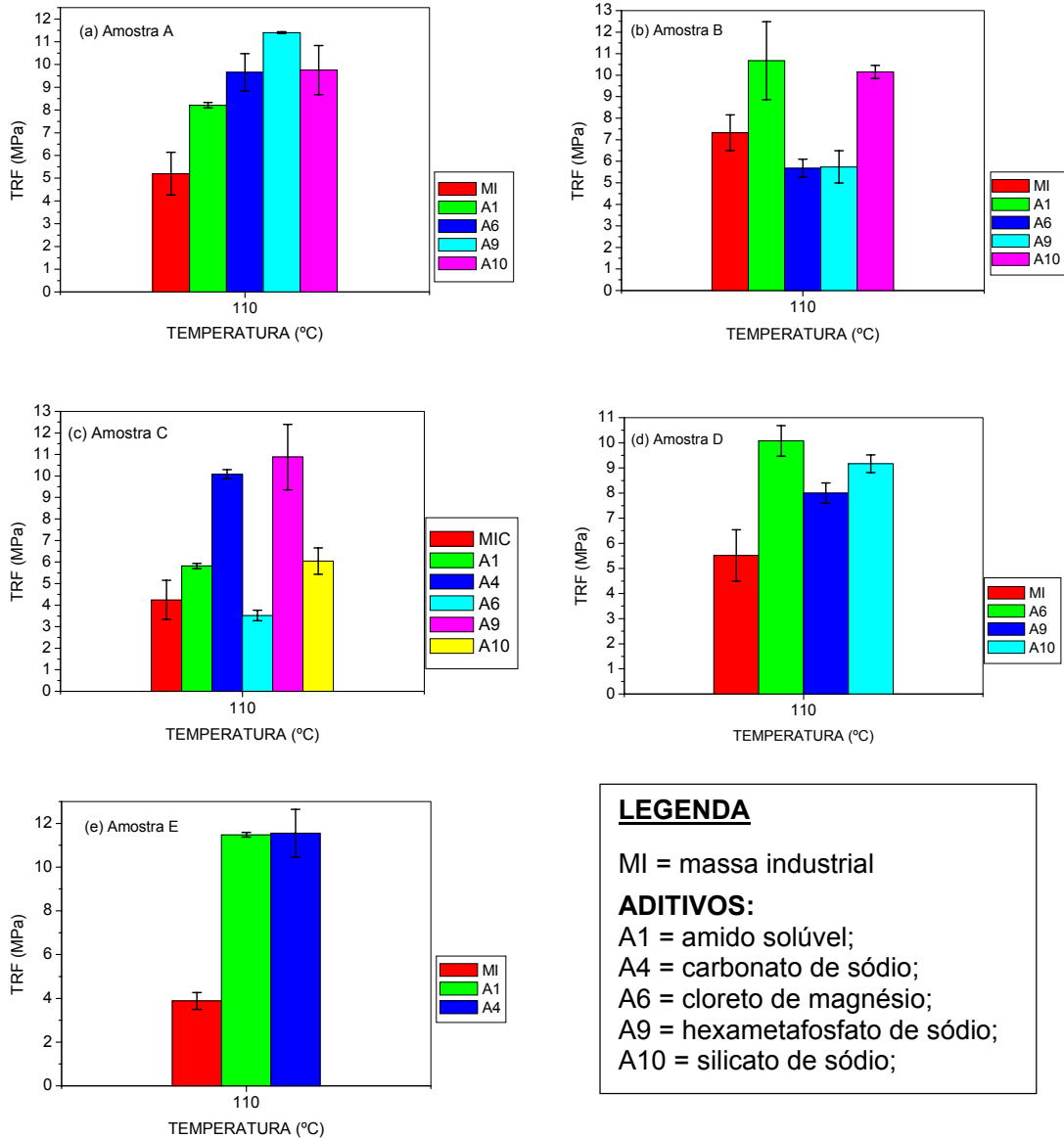


Figura 5.8: Tensão de Ruptura à Flexão das amostras aditivadas e industriais, secas a 110°C: (a) amostra **A**; (b) amostra **B**; (c) amostra **C**; (d) amostra **D** e (e) amostra **E**.

Analisando os dados referentes à tensão de ruptura à flexão, constantes na Figura 5.8, observa-se à luz das análises granulométricas e plasticidade, em que a

amostra **C** é mais plástica do que a amostra **E**, que apresentaram resultados ao contrário dos esperados. A justificativa para tal comportamento é provavelmente por ter a amostra **C** um maior teor de finos dificultando a ação dos aditivos usados em relação à amostra **E**, que tem um alto teor de partículas superior a 2 μm .

A análise conjunta das propriedades físico-mecânicas das amostras secas a 110°C mostra que as mesmas atendem aos valores limites preconizados em laboratório por BARZAGHI e SALGE (1982), para massas cerâmicas moldadas por extrusão.

Analisando os valores numéricos das Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 (Anexo I), onde constam os resultados dos ensaios completos, realizados nos corpos de prova processados por *extrusão* e sinterizados nas temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, respectivamente, e devido ao grande número de gráficos, foram omitidos os referentes às propriedades: *porosidade aparente*; *massa específica aparente*; *retração linear de queima e perda ao fogo*, construindo apenas os referentes à absorção de água e à tensão de ruptura à flexão, por serem os de maior importância no estudo das características tecnológicas de cerâmica vermelha.

A Figura 5.9 apresenta os gráficos por amostra da *absorção de água*, onde se verifica que os mesmos apresentam valores máximos de 15,32 \pm 0,50% (amostra **C**), com 0,5%A4 à temperatura de 900°C, tomado como referência o valor máximo de 25% de absorção. O que era esperado, uma vez que amostra **C**, é a mais plástica com um maior teor de fração argila entre as demais.

Ao observar os dados das Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12, tem-se que, para a *porosidade aparente*, registrou-se o valor máximo de 28,71 \pm 0,68% (amostra **C**), com 0,5%A4 à temperatura de 900°C, para o valor máximo de referência 35% de porosidade. Para a *massa específica aparente*, o valor mínimo foi de 1,55 \pm 0,02 g/cm³ (amostra **E**), com 1,5%A1 à temperatura de 1000°C, tomado como valor mínimo 1,70 g/cm³ de massa específica. Logo, nota-se que este valor está um pouco abaixo do valor especificado. Para a *retração linear de queima*, o valor máximo foi 4,60 \pm 0,26% (amostra **B**), com 1%A9 à temperatura de 1000°C, sem valor especificado de referência na literatura consultada. Para a *perda ao fogo*, o valor máximo foi de 9,34 \pm 0,08% (amostra **E**), com 1,5%A1 à temperatura de 1000°C, também sem valor especificado na literatura consultada.

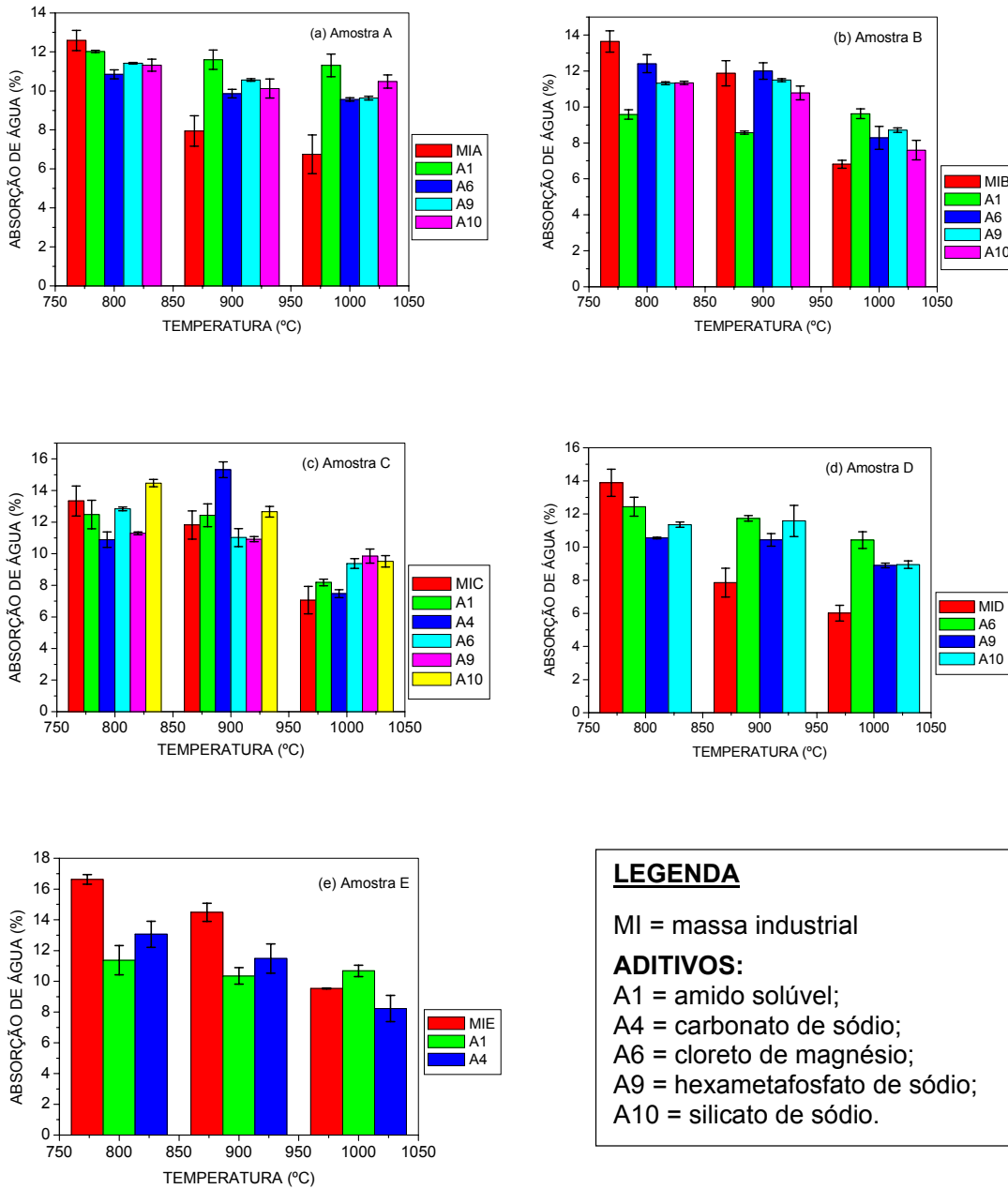


Figura 5.9: Absorção de Água das amostras aditivadas e industriais, sinterizadas nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C: (a) amostra A; (b) amostra B; (c) amostra C; (d) amostra D e (e) amostra E.

A Figura 5.10 apresenta os gráficos por amostra ensaiada para a *tensão de ruptura à flexão* onde se observa que o valor mínimo encontrado foi $8,49 \pm 0,06$ MPa (amostra **E**), com 1%A4 à temperatura de 800°C , para um valor mínimo especificado de 5,50 MPa, segundo BARZAGHI e SALGE (1982).

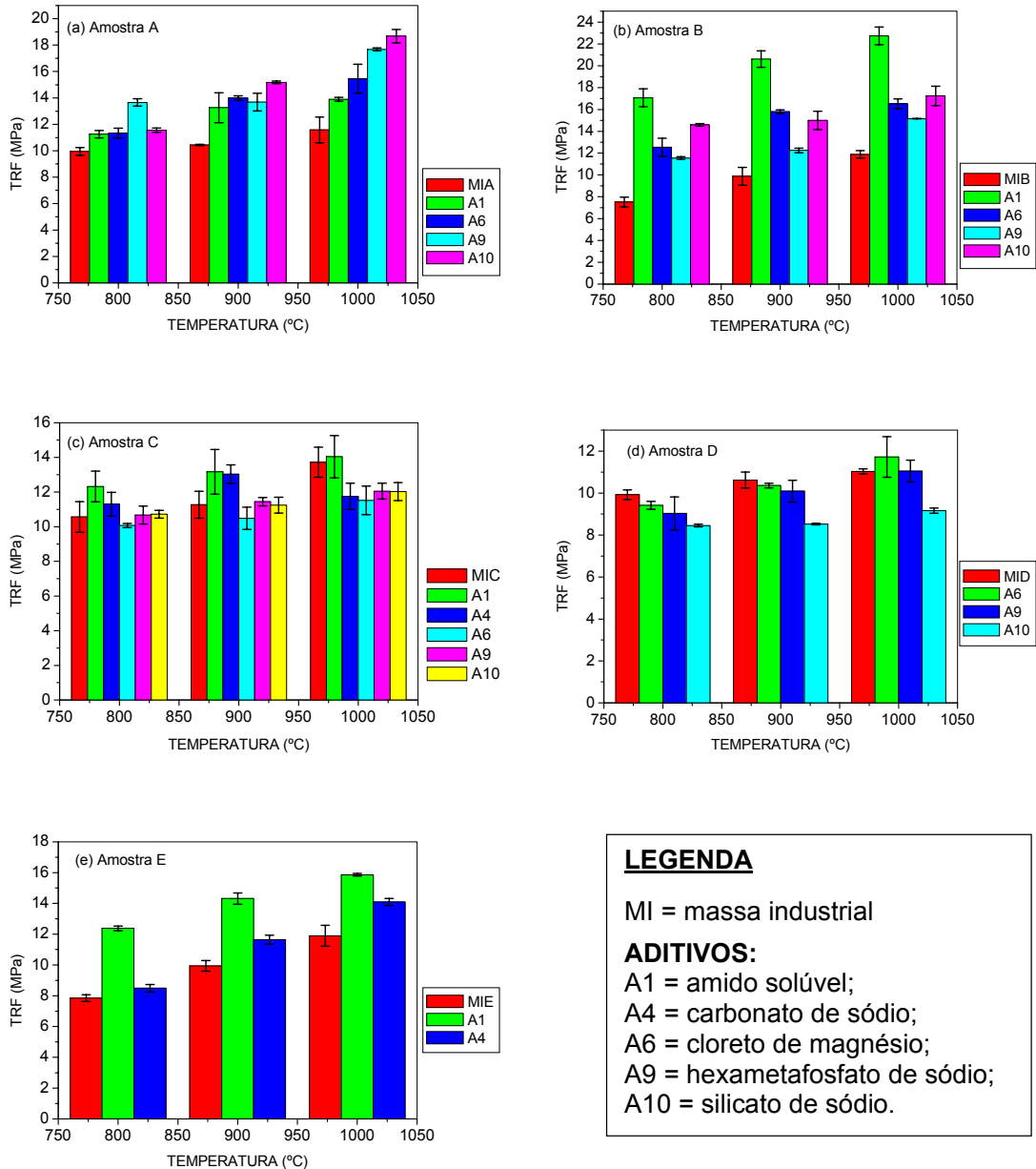


Figura 5.10: Tensão de Ruptura à Flexão das amostras aditivadas e industriais, sinterizadas nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C : (a) amostra **A**; (b) amostra **B**; (c) amostra **C**; (d) amostra **D** e (e) amostra **E**.

Determinadas as propriedades físico-mecânicas das amostras em estudo em corpos de prova processados por extrusão em massa tratada com os cinco aditivos químicos que mais baixaram o valor do limite de plasticidade das amostras, nota-se que houve uma influência significativa nos resultados dos ensaios em corpos de prova secos a 110°C em relação à amostra industrial, o que era esperado. Quanto aos resultados dos ensaios em corpos de prova sinterizados nas três temperaturas de queima, observa-se que não houve grandes prejuízos das propriedades físico-mecânicas, principalmente para a *absorção de água*, a *porosidade aparente*, a *massa específica aparente* e para a *tensão de ruptura à flexão*. Tomando como referência valores constantes à temperatura de 900°C, por ser a temperatura usual de queima para materiais de construção, conforme estudos realizados por BARZAGHI e SALGE (1982).

5.4 – Estudo comparativo das propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova extrudados com massas industriais e com massas aditivadas

Neste item são enfocados os resultados dos ensaios realizados em corpos de prova processados por extrusão com as massas industriais e com as aditivadas tratadas com os aditivos químicos que mais diminuíram o limite de plasticidade das amostras. A análise das figuras já descritas neste capítulo, que foram construídas com os valores resultantes dos ensaios com os dois tipos de massa, permite-nos fazer as seguintes observações, por propriedade físico-mecânica.

Quanto às amostras secas à temperatura de 110°C, conforme as Figuras 5.6; 5.7 e 5.8, onde a incorporação dos aditivos provocou uma redução do teor de água de extrusão, a maior redução se deu na amostra **E**, com a adição de 1,5%A1 (amido solúvel); para a *umidade de extrusão*. Provavelmente devido ao alto teor da fração areia e a ação dos aditivos utilizados, foi mais acentuada. Para a *retração linear de secagem*, houve uma variação desordenada de valores dependendo do aditivo utilizado, observa-se que o maior valor se deu na amostra **A**, tratada com 0,5%A1 (amido solúvel) e o menor ocorreu na amostra **E**, quando tratada com 1,5% do mesmo aditivo químico. Provavelmente devido ao percentual do aditivo A1, pois as amostras apresentam a mesma fração areia. E para a *tensão de ruptura à flexão*, houve um aumento significativo nos valores com exceção da amostra **B**, quando

tratada com 0,5%A6 e 1%A9 e da amostra **C**, quando tratada com 1%A1 e 1%A6, o que torna difícil explicar, pois ambas apresentam análises granulométricas diferentes, embora apresentem plasticidades praticamente iguais, o que leva suspeitar da ação dos aditivos utilizados nestas amostras.

Na análise conjunta das propriedades físico-mecânicas das amostras secas, observou-se o resultado esperado, segundo a literatura, chamando atenção para a significativa redução da quantidade de água de conformação, observada pela menor umidade de extrusão obtida com as amostras aditivadas, o que certamente acarretará menor gasto de energia para secagem da massa extrudada, tornando o processo mais econômico.

Em relação às amostras sinterizadas nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C, conforme Figuras de 5.9 e 5.10, devido ao grande número de gráficos, foram omitidos os referentes às propriedades: *porosidade aparente; massa específica aparente; retração linear de queima e perda ao fogo*, mas os respectivos valores se encontram nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 (Anexo I). Serão analisados apenas os valores referentes aos resultados das amostras queimadas à temperatura de 900°C, por ser a temperatura de referência para queima de produtos de cerâmica vermelha, conforme citado anteriormente, e por ser adotado o princípio defendido por SALOMÃO (1975) de que *é desejável que se mantenham ou diminuam os valores de propriedades como: absorção de água, massa específica aparente e porosidade aparente da massa, enquanto para a carga de ruptura se mantenham ou aumentem seus valores*.

Portanto, em uma análise por amostra, observa-se que para a amostra **A**, não houve redução da absorção de água nem da porosidade aparente, mas houve para a massa específica aparente, quando tratada com 0,5%A1, 0,5%A9 e 0,5%A10 e um aumento significativo para a tensão de ruptura à flexão, quando tratada com todos os aditivos. Para a amostra **B**, só não houve redução de valores para a absorção de água quando tratada com 0,5%A6, por pouca diferença de valor, para a porosidade aparente, houve redução de valor para todos os aditivos usados, e para a massa específica aparente, houve redução de valores quando tratada com 0,5%A6 e 1%A9, havendo aumento com os demais aditivos; e para a tensão de ruptura à flexão, houve aumento de valores com a adição de todos os aditivos. Para a amostra **C**, só houve redução de valores para a absorção de água e porosidade aparente,

quando tratada com 1%A6 e 1,5%A9; e para a massa específica aparente, só não houve redução de valor quando tratada com 1%A6, em relação à amostra industrial e para a tensão de ruptura à flexão, só o aditivo 1%A6 não melhorou o resultado, os demais atendem ao citado princípio. Para a amostra **D**, só houve influência de resultados para a massa específica aparente, quando tratada com todos os aditivos usados para esse ensaio, no sentido de atender ao princípio. Finalmente nota-se que para a amostra **E**, tratada apenas com dois aditivos (amido solúvel e carbonato de sódio), só não foram registrados resultados significativos para a massa específica aparente.

Em uma análise conjunta, observa-se que o uso dos aditivos selecionados em massas de cerâmica vermelha dá bons resultados nos produtos secos a 110°C, e que o amido solúvel e o silicato de sódio, foram os aditivos de melhor resultados. E, conforme informações teóricas, o uso de aditivos químicos nas massas utilizadas na fabricação de blocos altera o comportamento das mesmas durante o processamento, e conseqüentemente, as características do produto final.

De uma maneira geral, verifica-se, através dos dados obtidos, que existe uma relação coerente entre os valores crescentes da massa específica aparente com as reduções da porosidade aparente e da absorção de água, com o aumento da temperatura de queima, salvo pequenas exceções, para os dois tipos de massas estudadas.

5.5 – Conclusões Parciais

Após a análise e a discussão dos resultados dos ensaios com corpos de prova processados por extrusão com as massas industriais e aditivadas, podem ser relacionadas as seguintes conclusões parciais:

a) quanto às características de plasticidade com as amostras aditivadas, especificamente para o limite de plasticidade, onde se tem informações do teor de água de extrusão, observa-se que a maioria dos aditivos usados reduziu o valor do LP, pelo menos em uma das três proporções, o que resultará na

extrusão da massa plástica com uma quantidade menor de água de plasticidade, chamando a atenção para a amostra **B**, que ao ser tratada com 0,5% de cloreto de magnésio causou uma redução no limite de plasticidade de 21,57%, em relação à massa sem tratamento;

b) quanto às propriedades físico-mecânicas das amostras aditivadas, extrudadas e secas a 110°C, notam-se que a incorporação dos aditivos influenciou positivamente nos resultados, causando redução na água de extrusão na amostra **E** de 24,72%, quando tratada com 1,5% de amido solúvel, levando a concluir que a incorporação de aditivos, como auxiliar de extrusão, em massa plástica vermelha, diminui a quantidade de água de plasticidade, melhora as propriedades físico-mecânicas a seco, resultando em um menor consumo de energia no secador. E para os resultados dos ensaios com os corpos de prova sinterizados nas três temperaturas de queima, observa-se que há uma variação de resultados, tornando difícil classificar tais resultados, principalmente para a absorção de água, a porosidade aparente, a massa específica aparente, já que para a tensão de ruptura à flexão, a maioria das amostras tratadas com os diversos aditivos melhorou o resultado de resistência mecânica;

c) a comparação dos valores numéricos referentes às propriedades físico-mecânicas, entre corpos de prova extrudados com massas industriais e com massas aditivadas, leva a concluir que os corpos de prova secos confeccionados com as massas aditivadas resultaram em uma elevação de valores em relação aos das massas industriais. E quanto aos queimados nota-se que a incorporação dos aditivos selecionados influenciou positivamente com melhores resultados para a tensão de ruptura à flexão em relação aos resultados com as massas industriais, chamando a atenção para o bom desempenho do uso dos aditivos *amido solúvel, silicato de sódio e cloreto de magnésio*, este com pequenas exceções, que resultaram em melhores valores para as principais propriedades cerâmicas, confirmando dados da literatura, *em que o uso de aditivos reduz o teor de água de extrusão sem comprometer o desempenho do produto final.*

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÃO COM OS BLOCOS CERÂMICOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os ensaios realizados nos blocos cerâmicos, assim como os resultados dos ensaios tecnológicos realizados em corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos fornecidos pelos mesmos fornecedores das massas industriais. Além de ser discutido um estudo comparativo das propriedades físico-mecânicas entre os corpos de prova extrudados com as massas industriais e as aditivadas em laboratório e os retirados dos blocos cerâmicos industrializados. No final, são apresentadas as conclusões parciais.

6.1 – Características Físicas e Mecânicas dos Blocos Cerâmicos

Neste item discutiremos os resultados dos ensaios realizados nos blocos cerâmicos de oito furos, fornecidos pelas mesmas unidades fabris das massas plásticas industriais que foram ensaiadas e analisadas nos itens anteriores deste trabalho de pesquisa.

As Figuras 6.1(a, b) e a Tabela 6.1 apresentam os resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados nos blocos de oito furos, conforme a metodologia constante nas normas técnicas NBR 8947(1985) e NBR 6461(1983) e a especificação da norma NBR 7171(1992).

Analisando os valores constantes na citada tabela, verifica-se que para a *absorção de água*, observa-se que os valores obtidos variaram de um mínimo de $8,97 \pm 0,18\%$ (amostra **A**) a um máximo de $12,65 \pm 0,14\%$ (amostra **E**) para uma faixa especificada de valores de 8% a 25% e para a *resistência à compressão simples* a variação foi de um mínimo de $0,52 \pm 0,20$ MPa (amostra **E**) a um máximo de $2,26 \pm 0,58$ MPa (amostra **C**), para um valor mínimo especificado de 1,0 MPa (10 kgf/cm²). Estes resultados foram obtidos da média aritmética de 24 unidades de blocos furados para cada amostra analisada.

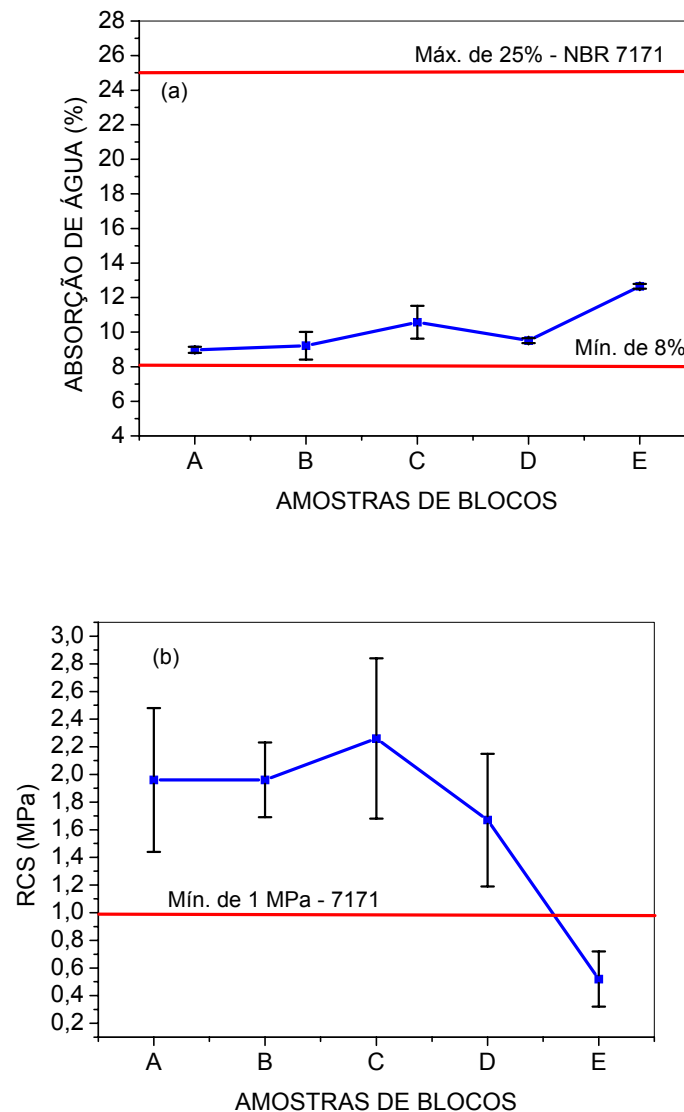


Figura 6.1: Gráficos das características físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos industrializados: (a) absorção de água e (b) resistência à compressão simples.

Analisando graficamente as Figuras 6.1(a, b), observa-se que apenas a amostra **E** não atende ao valor mínimo especificado, correspondendo a 20% das amostras analisadas, asseguradamente por ser a única fábrica de blocos, entre as que forneceram materiais para esta pesquisa, que usa forno do tipo caieira, que é um forno a céu aberto onde não há controle da temperatura de queima.

6.2 – Propriedades físico-mecânicas em corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos

A Figura 6.2 (a, b, c, d), a seguir, e a Tabela 6.2 (Anexo I) apresentam os resultados dos ensaios cerâmicos efetuados com corpos de prova, retirados dos blocos cerâmicos industriais, determinando-se as seguintes propriedades físico-mecânicas: *absorção de água*; *porosidade aparente*; *massa específica aparente* e *tensão de ruptura à flexão*, esta determinada através do método de três pontos. Analisando os dados constantes na citada tabela, verifica-se que os corpos cerâmicos estudados apresentaram valores máximos para *absorção de água* de $14,47 \pm 0,24\%$ (amostra **E**); *porosidade aparente* de $26,92 \pm 1,06\%$ (amostra **E**); *massa específica aparente* de $2,06 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ (amostra **B**) e *tensão de ruptura à flexão* de $10,38 \pm 0,82 \text{ MPa}$ (amostra **B**).

Ao analisar os valores numéricos das propriedades físico-mecânicas dos ensaios realizados nos corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos de oito furos, conforme descrevem as curvas da Figura 6.2(a, b, c, d), observa-se, que os valores obtidos estão na faixa exigida, salvo pequenas diferenças de valores, como para a *massa específica aparente* (amostras **B** e **C**) e *tensão de ruptura* (amostra **E**). Comparando esses valores com as propriedades físico-mecânicas, tomadas como referência à temperatura de 900°C usual para blocos cerâmicos, segundo a literatura, e analisando especificamente os resultados numéricos da *absorção de água* (*máximo de 25%*) e da *tensão de ruptura à flexão* (*mínimo de 5,50 MPa*), após queima, segundo valores limites preconizados por BARZAGHI e SALGE (1982), conclui-se que as amostras estudadas satisfazem aos valores de referência.

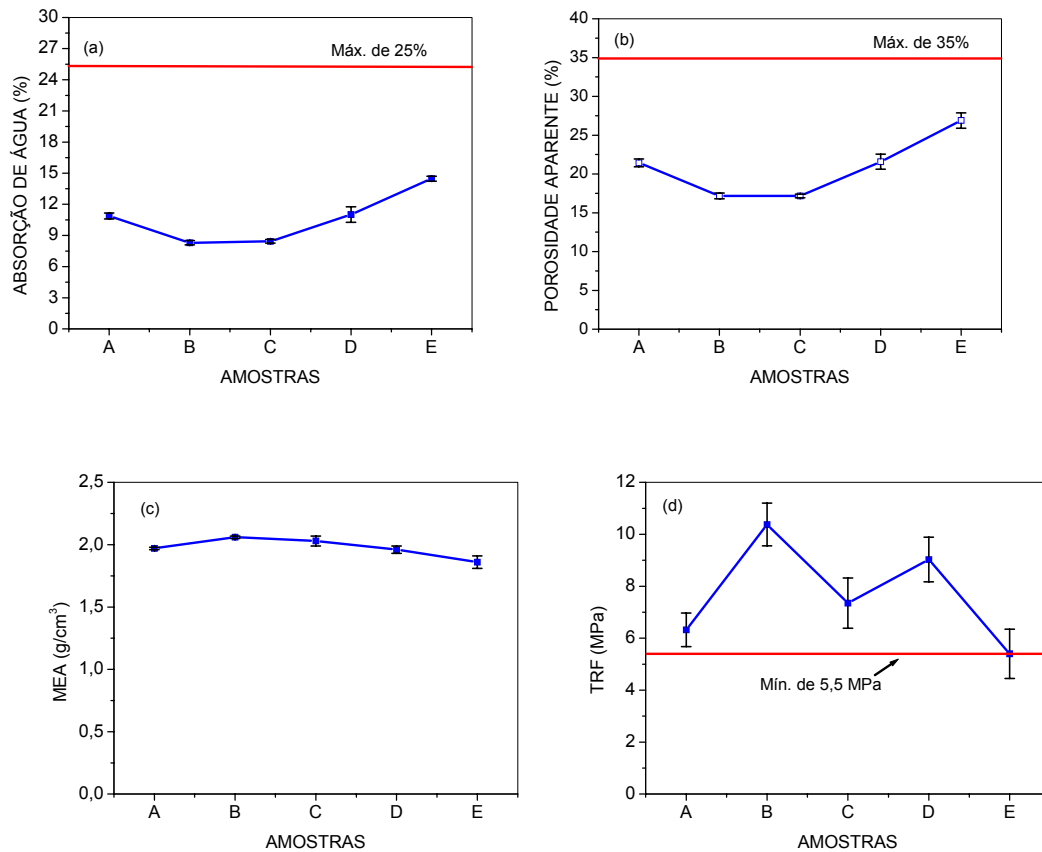


Figura 6.2 – Gráficos das propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos industrializados: (a) absorção de água; (b) porosidade aparente; (c) massa específica aparente e (d) tensão de ruptura à flexão.

6.3 – Estudo comparativo das propriedades físico-mecânicas entre os corpos de prova extrudados em laboratório com as massas industriais e as aditivadas e os retirados dos blocos cerâmicos industrializados

As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam os gráficos comparativos, construídos a partir das Tabelas 4.8, 5.11 e 6.2, referentes aos ensaios tecnológicos realizados em corpos de prova processados por extrusão em laboratório com as massas industriais, as aditivadas e os retirados dos blocos cerâmicos,

respectivamente. A análise se detém aos valores numéricos referentes às propriedades físico-mecânicas das amostras, quanto à *absorção de água*, a *porosidade aparente* e a *tensão de ruptura à flexão*, considerando a temperatura de 900°C, segundo valores limites preconizados por BARZAGHI e SALGE (1982) e, por ser a temperatura usual de queima dos blocos cerâmicos para construção civil.

Para a *absorção de água*, observa-se que há uma maior absorção de água para os corpos de prova confeccionados em laboratório para as amostras **B** e **C**, enquanto que para as demais amostras ocorreu o contrário em relação aos blocos cortados (BC). Para a *porosidade aparente*, nota-se que os resultados são maiores para o material extrudado em laboratório nas amostras **B**, **C** e **E**, nas demais amostras o resultado foi inferior. Já para a *massa específica aparente*, nota-se que não houve grandes diferenças de valores entre os corpos de prova analisados. Finalmente, para a *tensão de ruptura à flexão*, (ver Figura 6.3) observa-se que para os corpos de prova confeccionados no laboratório, os valores são superiores aos dos retirados dos blocos industriais, exceto para a amostra **B**, sem tratamento, e para a amostra **D**, aditivada com 1,5% de silicato de sódio. Portanto, não há uma regularidade dos resultados, o que era esperado, pois nos corpos de prova confeccionados em laboratório, houve um controle rigoroso na preparação dos corpos de prova, em todas as etapas, enquanto que no corpo de prova retirado do bloco industrial, não se registra nenhum tipo de controle dos fatores que influenciam a qualidade do produto final, principalmente da granulometria, da umidade de extrusão, dos ciclos de secagem e de queima, tendo-se constatado por isso um elevado número de trincas e defeitos visíveis ao olho nu.

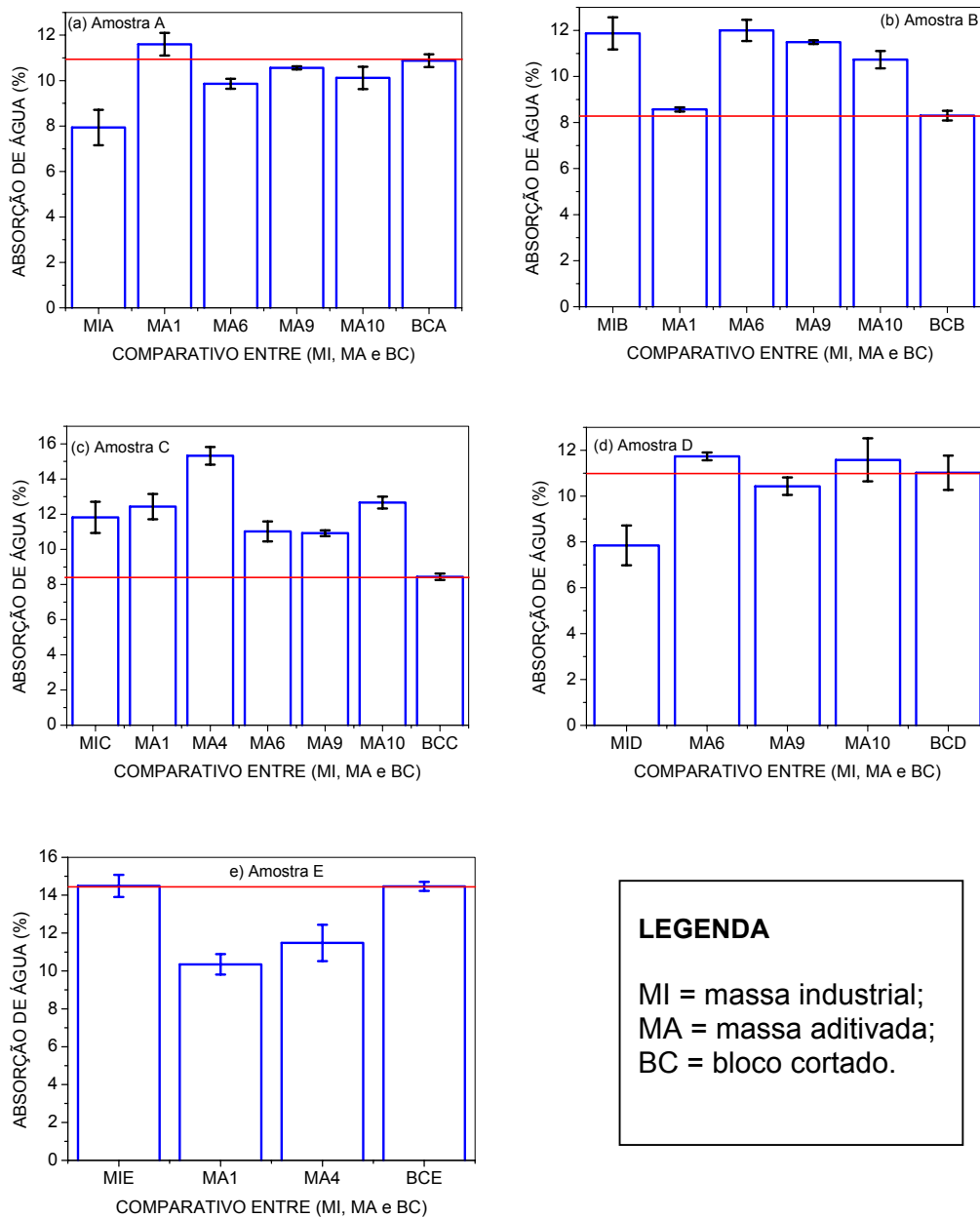


Figura 6.3: Gráficos comparativos dos resultados da absorção de água entre os corpos de prova confeccionados em laboratório com as massas industriais (MI), as aditivadas (MA) e os dos blocos cortados (BC): (a) amostra **A**; (b) amostra **B**; (c) amostra **C**; d) amostra **D** e (e) amostra **E**.

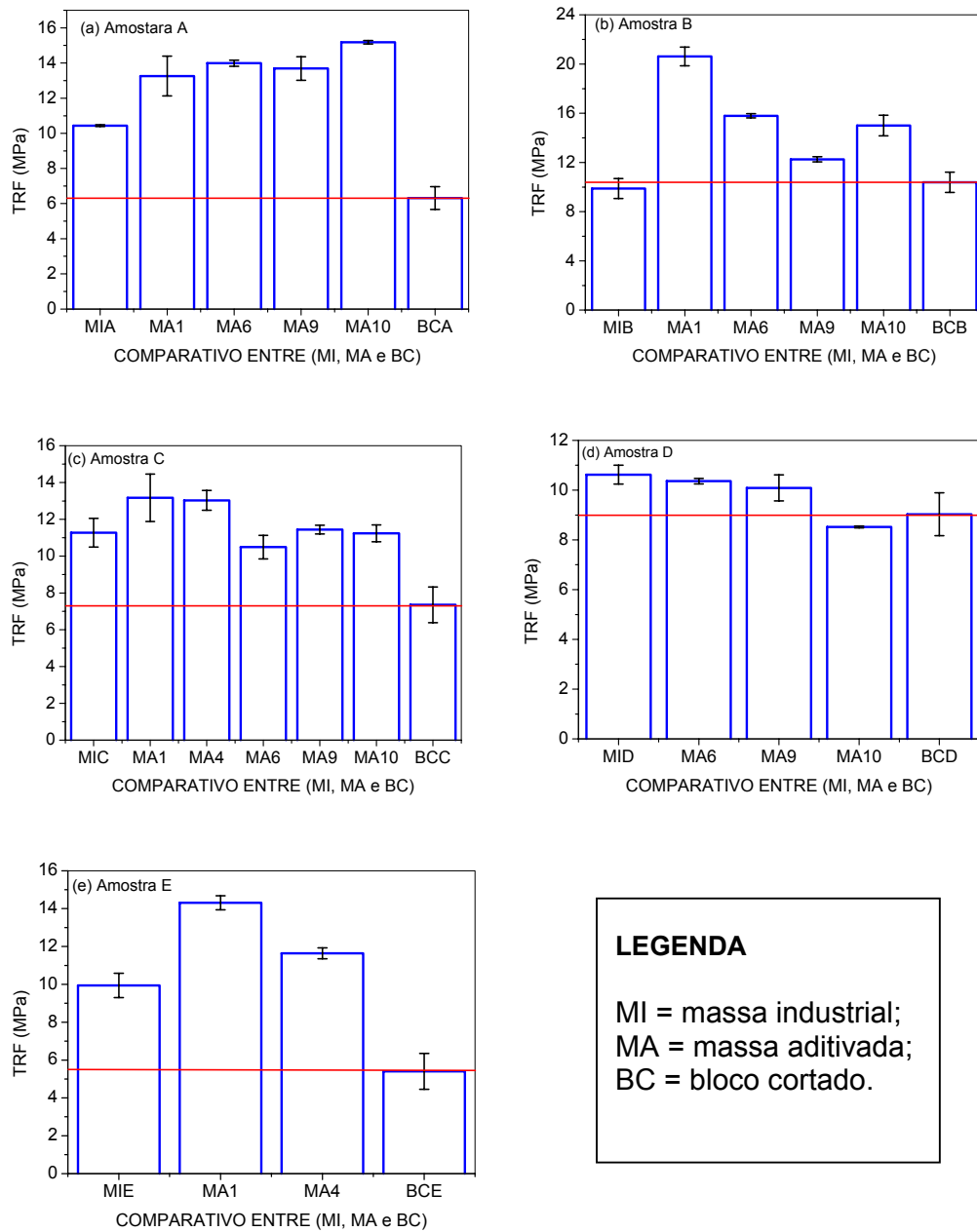


Figura 6.4: Gráficos comparativos dos resultados da tensão de ruptura à flexão entre os corpos de prova confeccionados em laboratório com as massas industriais (MI), as aditivadas (MA) e os dos blocos cortados (BC): (a) amostra **A**; (b) amostra **B**; (c) amostra **C**; d) amostra **D** e (e) amostra **E**.

6.4 – Conclusões Parciais

Após a análise e a discussão dos resultados dos ensaios com os blocos cerâmicos, podem ser relacionadas as seguintes conclusões parciais:

a) a média dos dados numéricos das características físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos de oito furos industrializados mostra que, quanto à *absorção de água*, as amostras apresentaram valores dentro da faixa especificada (8 a 25%). E quanto à *resistência mecânica à compressão simples*, as amostras **A**, **B**, **C** e **D** atendem à classe 15 ($1,5 \text{ MPa} < \text{resistência} < 2,5 \text{ MPa}$) e a amostra **E** não atende ao mínimo da classe 10 ($1,0 \text{ MPa}$), segundo a norma NBR 7171 (1992), por ser a única amostra que foi queimada em forno do tipo caieira, a céu aberto;

b) os dados das propriedades físico-mecânicas dos ensaios completos realizados nos corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos industrializados tendo como referência os valores limites à temperatura de 900°C , permitem concluir que as amostras estudadas satisfazem aos valores mínimos especificados, segundo dados obtidos por BARZAGHI e SALGE (1982).

c) a comparação dos dados referentes às propriedades físico-mecânicas, entre corpos de prova extrudados em laboratório com as massas industriais, as aditivadas e os retirados dos blocos industriais, leva a concluir que os valores resultantes não apresentam grandes diferenças em relação aos confeccionados em laboratório, quanto à absorção de água, à porosidade aparente e à massa específica aparente. Já quanto à tensão de ruptura à flexão, observa-se que, para corpos de prova confeccionados em laboratório os valores são superiores aos retirados dos blocos industriais, na maioria das amostras. O que era esperado, pois para os corpos de prova preparados em laboratório, houve um controle rigoroso em todas suas fases, resultando em produtos de melhor qualidade, sem trincas e sem defeitos visíveis, observados ao olho nu.

7 – CONCLUSÕES FINAIS

Foi estudada a influência de aditivos na extrudabilidade de massas plásticas para uso na confecção de blocos cerâmicos de diferentes bacias hidrográficas do Estado da Paraíba. Confrontando os objetivos desta pesquisa com os resultados alcançados com base nos ensaios laboratoriais com as amostras de massas industriais e aditivadas para cerâmica vermelha, pode-se concluir que:

- i) com base nos resultados dos ensaios da análise granulométrica por difração a laser, as amostras apresentaram composição granulométrica dentro da faixa típica de massas cerâmicas vermelhas;
- ii) em relação às características de plasticidade das massas, verifica-se que os resultados estão na faixa de valores aceitáveis uma vez que atendem a uma faixa mínima;
- iii) em relação à análise química, observa-se que as amostras apresentam composições químicas típicas para massa cerâmica vermelha, com teores de ferro superiores a 5%, o que confere a coloração vermelha após queima;
- iv) os termogramas das cinco amostras analisadas estão de acordo com os termogramas apresentados em estudos anteriores com as massas plásticas das bacias hidrográficas estudadas;
- v) em relação à análise da difração de raios-X, observa-se que as amostras apresentaram em sua composição mineralógica principalmente as fases caulinita, feldspato, mica/ilita, montmorilonita e quartzo;
- vi) após a caracterização preliminar das massas industriais, nota-se que todas as amostras estudadas são adequadas para fabricação de blocos cerâmicos;
- vii) quanto às propriedades físico-mecânicas das amostras processadas por *extrusão* por comparação com valores limites tomados como referências (e considerando a temperatura de 900°C) as amostras estudadas confirmam sua viabilidade para confecção de blocos cerâmicos;
- viii) os dados das características de plasticidade, especificamente para o *limite de plasticidade*, mostram que a maioria dos aditivos usados conseguiu reduzir o valor do limite de plasticidade, quando comparado com a mesma amostra industrial o que atende aos objetivos propostos;

ix) o estudo comparativo entre as propriedades físico-mecânicas em corpos de prova extrudados com massas industriais e com massas aditivadas, leva a concluir que os corpos de prova secos confeccionados com as massas aditivadas resultaram em uma redução significativa na água de extrusão, em relação aos das massas industriais. Isso acarretará um menor gasto de energia na secagem de blocos cerâmicos, tornando o processo mais econômico.

x) a incorporação dos aditivos selecionados influenciou positivamente nos resultados das propriedades físico-mecânicas, em relação aos resultados com as massas industriais, principalmente para os aditivos, amido solúvel, silicato de sódio e cloreto de magnésio, que resultaram em melhores valores para as principais propriedades cerâmicas;

xi) quanto à absorção de água, todas as amostras dos blocos cerâmicos atendem à faixa de valores especificados; e quanto à resistência mecânica à compressão simples, apenas a amostra **E** não atende ao mínimo padronizado por ter seus blocos queimados em temperaturas abaixo do especificado;

xii) os resultados das propriedades físico-mecânicas dos ensaios, realizados nos corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos, permitem concluir que as amostras estudadas satisfazem aos valores mínimos especificados;

xiii) a comparação dos valores numéricos referentes às propriedades físico-mecânicas entre corpos de prova extrudados em laboratório e os retirados dos blocos industriais, leva a concluir que os valores resultantes não apresentam grandes diferenças em relação aos corpos de prova confeccionados em laboratório, quanto à *absorção de água, à porosidade aparente e à massa específica aparente*. Mas para os valores de *tensão de ruptura à flexão*, nota-se que os dados para os corpos de prova confeccionados no laboratório são superiores aos retirados dos blocos industriais.

Finalmente observa-se que as conclusões apresentadas atendem aos objetivos propostos, chamando a atenção para as características de plasticidade, uma vez que há uma variabilidade de valores para cada amostra analisada, não sendo justificado o mecanismo de ação de cada aditivo, o que é aceitável, pois cada amostra apresenta uma composição mineralógica muito complexa e diversificada.

8 - SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

O presente trabalho pretendeu reunir os resultados dos ensaios de caracterização e tecnológicos em cinco amostras de massas plásticas vermelhas (*sem aditivos químicos*) e aditivadas, usadas na fabricação de blocos cerâmicos empregados na construção civil, bem como a verificação das características físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos de oito furos, fabricados no Estado da Paraíba.

Com base nas conclusões obtidas, verifica-se a necessidade de outros estudos que possam ajudar a encontrar novas soluções. Para isso são apontadas as seguintes sugestões:

1. Realização de estudos específicos visando outras utilizações industriais, como telhas, manilhas, agregados leves, ladrilhos de pisos, lajotas para lajes premoldadas e blocos cerâmicos para lajes (elementos de lajes).
2. Realização de ensaios de exame de superfícies de fratura em corpos de prova através do MEV.
3. Proceder à aditivação com menores proporções de aditivos, isto é, com uma fração de 0,25% para cada aditivo.
4. Realizar ensaios de plasticidade em aparelhos mais precisos como o plasticímetro ou plastógrafo de Brabender.
5. Proceder a um estudo detalhado de cada amostra de massa vermelha, devido a sua composição mineralógica complexa, apresentando contaminações de esmectitas e comportamentos diferenciados dos modelos teóricos.
6. Verificar a influência do mecanismo de ação dos aditivos nas massas plásticas vermelhas, selecionadas.
7. Realizar estudos de viabilidade econômica em relação ao uso de aditivos químicos em processamento de blocos cerâmicos.
8. Fazer uma análise reológica dos aditivos.

9 – FONTES CONSULTADAS

- ÁLBARO, J.L.A. **A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte III: Variáveis do processo de compactação** *Cerâmica Industrial*, v. 6, nº. 1, 2001, 15p. Disponível em <<http://www.ceramicaindustrial.org.br/publicações.html>>. Acesso em: 26 nov. 2004.
- ALVES, F.B., VIEIRA, C.M.F., MONTEIRO, S. N. **Caracterização de argilas da fazenda Santa Helena do município de campos dos Goytazes-RJ.** In: *ANAIS DO XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Porto Alegre,:* 2004.
- AMARANTE JÚNIOR, A.; PRACIDELLI, S. **Considerações sobre os efeitos da adição de carbonato de sódio na plasticidade de uma argila de Jacupiranga-SP.** *Cerâmica*, v. 25, nº. 118, 1979, 247p.
- ANGELERI, F. B., **Considerações sobre plasticidade das argilas na fabricação de manilhas,** *Cerâmica*, v. 28, nº. 151, 1982, 264p.
- ANÔNIMO, **Laboratório de Análise de Materiais,** UFCG/CCT/DMG, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8043:** Bloco cerâmico para alvenaria – determinação da área líquida. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6461:** Bloco cerâmico para alvenaria – verificação da resistência à compressão – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8947:** Telha cerâmica - determinação da massa e da absorção de água - método de ensaio - Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7171:** Bloco cerâmico para alvenaria – especificações. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8042:** Bloco cerâmico para alvenaria – formas e dimensões. Rio de Janeiro, 1992.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **ABC**: Disponível em <<http://www.abceram.org.br/informações.html>>. Acesso em: 16 ago. 2004.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **ANICER**: Disponível em <<http://www.anicer.com.br/dados.htm>>. Acesso em: 21 jun. 2004.
- BARBA, A.; BELTRÁN, V.; FELIU, C.; GARCÍA, J.; GINÉS, F.; SÁNCHEZ, E.; SANZ, V. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. ITC, 1ª. Ed. Castellón, España. 1977.
- BARZAGHI, L.; SALGE, A. **Argilas para materiais de construção**. *Cerâmica*, v. 28, nº. 151, 1982, 300p.
- BRUMATI, P.A. **Utilização de ceras naturais no processo de moldagem de cerâmicas por injeção**. 2002. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - CCET/UFSCar, São Carlos, 1995.
- CARVALHO, O.O.; LEITE, J.Y.P.; PORPINO, L.A.F.; PORPINO FILHO, W. A.; ANDRADE, J.C.S. **Análise do processo produtivo da cerâmica CECIDA – Guarabira/PB**. In: *ANAIS DO 45º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA* Florianópolis: 2001.
- CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. LTC, 5ª. Ed., Rio de Janeiro, 2002.
- CAMPOS, L.F.A. **Estudo da expansão por umidade (EPU) em blocos cerâmicos do Estado da Paraíba**. 2002. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - CCT/UFPB, Campina Grande, 2002.
- CAMPOS, L.F.A.; MACEDO, R.S.; FERREIRA, H.C. **Variação das características de argilas para cerâmica vermelha em função de aditivos químicos**. In: *Anais do 13º. CBECIMAT*, Curitiba, PR, 1998.

- CAMPOS, L.F.A.; MACEDO, R.S.; FERREIRA, H.C.; KIYORARA, P.K. **Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural.** *Cerâmica*, v. 45, nº. 140, 1999, 295p.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações fundamentais**, *Livros Técnicos*, v. 1, Rio de Janeiro, 1994.
- CHIARA, G.D.; BORRONI, G.M.; CHIARA, A.D. **A tecnologia do processo de produção na indústria de cerâmica vermelha.** Curso de formação para profissionais da indústria de cerâmica vermelha, apostila, ACIMAC/IEC, Florianópolis, 2000.
- CRUZ, T.T. **Qualidade e viabilidade de matérias-primas cerâmicas.** *Cerâmica Industrial*, v. 7, nº. 5, 2002, 40p.
- DUPAS, M.A. **Pesquisando e normalizando – Noções básicas e recomendações úteis para a elaboração de trabalhos científicos.** São Carlos: *EDUFSCAR* 2002, 73 p.
- GARCÍA, J.; SÁNCHEZ, E.; AMORÓS, J.L.; GARCIA, M.C. **Composições para a fabricação de revestimentos cerâmicos. Influência dos distintos componentes sobre o seu comportamento no processo de fabricação.** *Cerâmica Informação*, nº. 4, 1990, 15p.
- GESICKI, A.L.D.; BOGGIANI, P.C.; SALVETTI, A.R. **Panorama produtivo da indústria de cerâmica vermelha em Mato Grosso do Sul.** *Cerâmica Industrial*, v. 7, nº. 1, 2002, 44p.
- GUIMARÃES, F.R. **Como fazer? Diretrizes para a elaboração de trabalhos monográficos.** Campina Grande: *EDUEPB*, 2002. 119 p.
- GOULART, E.P. **Caracterização de matérias-primas, parte II.** Apostila, ABC, Blumenau, 1994.
- GRIM, R.E. **Clay mineralogy in relation to the engineering properties of clay materials, applied clay mineralogy.** Mac Grow-Hill, New York. 1962.
- GRIMSHAW, R.W. **The chemistry and physics of clays and allied ceramics materials.** London, *Ed. 4, Ernest Benn*, 1971.

- LIMA, R.C. **Granulometria de solos lateríticos: metodologia, efeito das energias térmicas e relação com a composição química e mineralógica.** 1983. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), CCT/UFPB, Campina Grande, 1983.
- LIMA, R.M.F.; LUZ, J.A.M. **Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Regime turbulento e intermediário.** *Revista Escola de Minas*, v. 54, nº. 2, 2001. Disponível em <<http://www.scielo.br/scielo.php>>. Acesso em: 26 nov. 2004.
- MACEDO, R.S. **Estudo das matérias-primas e tijolos furados produzidos no estado da Paraíba.** 1987. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - CCT/UFPB, Campina Grande, 1997.
- MÁS, E. **Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha.** Criciúma, *Pólo Produções*, Apostilas de 1 a 4, 2002.
- MASSOLA, D. **Cerâmica, uma história feita à mão.** Ática, São Paulo. 1994.
- MENEZES, R.R.; NEVES, G.A; FERREIRA, H.C. **Mapeamento de argilas do estado da Paraíba.** *Cerâmica*, v. 47, nº. 302, 2001, 77p.
- MENEZES, R.R.; NEVES, G.A; PATRÍCIO, S.M.R.; FERREIRA, H.C. **Reaproveitamento de resíduo da produção de agregado como matéria-prima alternativa na confecção de tijolos e telhas.** *Interação*, nº. 2, 2003, 1p.
- MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. **Solid state sintering of red ceramics at lower temperatures.** *Ceramics International*, v. 30, p. 381-387, 2004.
- MOTTA, J.F.M.; ZANARDO, A.; CABRAL Jr, M. **As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos.** *Cerâmica Industrial*, v. 6, nº. 2, 2001, 28p.
- MOTTA, J.F.M.; CABRAL Jr, M.; TANNO, L. C.; ZANARDO, A.; **As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional.** *Cerâmica Industrial*, v. 7, nº. 1, 2002, 33p.
- MOTTA, J.F.M.; CABRAL Jr, M.; TANNO, L. C.; ZANARDO, A.; CUCHIERATO, G.; **As matérias-primas plásticas para a cerâmica tradicional: Argilas e caulins.** *Cerâmica Industrial*, v. 9, nº. 2, 2004, 33p.

- NAVARRO, R.F. **Materiais e ambiente**. EDUFPB/CCT, João Pessoa, 2001.
- NEVES, G. A. **Reciclagem de resíduos da serragem de granito para uso como matéria-prima cerâmica**. 2002. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - CCT/UFMG, Campina Grande, Brasil, 2002.
- NIZZOLA, L.D. **Processo de extrusão, normas e princípios**, Jornal da ANICER, Ano 4, Ed. 17, Porto Alegre – RS, 2001, 14p.
- NORTON, F.H. **Introdução à tecnologia cerâmica**, tradução de Jefferson Vieira Souza. *Edgard Blücher*, São Paulo, 1973.
- OLIVEIRA, G.E.; HOLANDA, J.N.F. **Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 50, nº. 314, 2004, 75p.
- OLIVEIRA, A.P.N.; MORTEDO, O.R.K.; PIZETO, J.; CASAGRANDE, M. **Matérias-primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre as propriedades do produto final**. seção cerâmica estrutural. s/d. Disponível em <<http://www.ctc.gov.br/publicações.html>>. Acesso em: 21 set. 2004.
- OLIVEIRA, I.V.; STUDEDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: *Fazendo Arte Editorial*, 2000.
- ONODA, G.Y.; HENCH, L.L. **Ceramic processing before firing**. USA: *John Wiley*, 1978.
- PEREIRA, E. A.; ACCHAR, W.; LEITE, J. Y. P.; SALES, C. R. **Caracterização tecnológica de argilas para aplicação em cerâmica vermelha**. In: *ANAIS DO 46º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, São Paulo: 2002.
- PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F.G. **Importância da composição granulométrica de massas para cerâmica vermelha**. *Cerâmica Industrial*, v. 2, nº. 1-2, 1997, 31p.
- POLOCERÂMICO. Disponível em: <<http://www.poloceramico.com.br/senai.html>>. Acesso em: 19 nov. 2002.

- RAWET, J.; SOUZA SANTOS, P. **Estudo sobre a variação do limite de plasticidade de três argilas do estado de São Paulo pelo efeito de alguns aditivos.** *Cerâmica*, v. 26, n°. 128, 1980, 193p.
- REED, J.S. **Principles of ceramics processing.** USA: *John Wiley*, 1995.
- RIBEIRO, M.J.; FERREIRA, A.A.L.; LABRINCHA, J.A. **Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas.** *Cerâmica Industrial*, v. 8, n°. 1, 2003. Disponível em: <<http://www.ceramicaindustrial.org.br/publicações.html>>. Acesso em: 12 jul. 2003.
- RIBEIRO, C.G.; CORREIA, M.G.; FERREIRA, L.G.; GONÇALVES, A.M.; RIBEIRO, M.J.P.; FERREIRA, A.A.L. **Estudo sobre a influência da matéria orgânica na plasticidade e no comportamento térmico de uma argila.** *Cerâmica Industrial*, v. 9, n°. 3, 2004. Disponível em: <<http://www.ceramicaindustrial.org.br/publicações.html>>. Acesso em: 17 dez. 2004.
- RODRIGUES, S.; SANTOS, P.S. **O sistema argila-água: uma revisão de literatura.** *Cerâmica*, v. 24, n°. 10, 1978, 253p.
- SANTANA, L.N.L. **Aplicação do processamento viscoplástico para a obtenção de placas cerâmicas laminadas.** 2002.133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - *PPGEM/UFSC*, Florianópolis, Brasil, 2002.
- SALOMÃO, J.R.; SANTOS P.S. **Efeito de alguns aditivos no limite de plasticidade de argilas cerâmicas plásticas usadas em sanitários.** *Cerâmica*, v. 25, n°. 118, 1979, 247p.
- SALOMÃO, J.R. **Estudo da influência de aditivos na plasticidade de argilas piroexpansíveis do Estado de São Paulo.** 1975. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - *POLI/USP*, São Paulo, 1975.
- SILVA, D.M. **Produtos químicos – defloculantes.** *Mundo Cerâmico*, v. 24-A, 1996, 108p.
- SILVEIRA, L.C.S. **Plasticidade de solos lateríticos: métodos de ensaios e efeito da temperatura de secagem.** 1984. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), *CCT/UFPB*, Campina Grande, 1984.

- SINGER, F.; SINGER, S.S. **Industrial ceramics**. London, *Chapman & Hall*, 1971.
- SMITH, W.F. **Princípios de ciência e engenharia de materiais**. Portugal, *McGraw-Hil*, 1998.
- SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. São Paulo: v. I e II, *Edgard Blücher*, 1992.
- VERÇOZA, E.J. **Materiais de construção**. 2ª ed. Porto Alegre: *Sagra*, 1975.
- VIEIRA, C.M.F.; HOLANDA, J.N.F.; PINATTI, D.G. **Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes - RJ**. *Cerâmica*, v. 46, nº. 297, 2000, 15-18p.
- VIEIRA, C.M.F.; SALES, H.F.; MONTEIRO, S.N. **Efeito da adição de argila fundente ilítica em cerâmica vermelha de argilas cauliníticas**. *Cerâmica*, v. 50, nº. 315, 2004, 239-246p.
- 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, nº. 315, 2004, 254-260p.
- ZANDONADI, A.R. **Cerâmica vermelha, em debate, perdas de mercado e modernização**. *Cerâmica*, v.35, nº. 237, 1989, 6p.
- ZANDONADI, A.R.; JORDÃO, M.A.P. **Informações técnicas sobre cerâmica**. *Anuário brasileiro de cerâmica*, ABC, São Paulo, 2002.
- <<http://www.pr.gov.br/mineropar/argila.html>>. Acesso em: 10 jul. 2004.
- <<http://www.scielo.br/scielo.php.html>>. Acesso em: 17 dez. 2004.
- <<http://www.periodicos.capes.gov.org.br.html>>. Acesso em: 17 dez. 2004.
- <<http://www.sciencedirect.com/journals.html>>. Acesso em: 17 dez. 2004.

ANEXO I

Tabelas construídas com base nos resultados dos ensaios laboratoriais.

TABELA 4.5 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa industrial, *moldados por prensagem* e secos na temperatura de 110°C.

AMOSTRAS	UMIDADE DE PRENSAGEM (%)	RETRAÇÃO LINEAR DE SECAGEM (%)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	9,53±0,13	0,80±0,14	3,04±0,10
B	9,76±0,25	0,66±0,00	4,58±0,62
C	9,93±0,38	0,50±0,07	6,09±1,00
D	8,36±0,15	0,51±0,13	3,03±0,10
E	9,35± 0,17	0,67±0,17	5,52±0,81

1 MPa \cong 10 kgf/cm²

TABELA 4.6 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa industrial, *moldados por prensagem* e sinterizados nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C.

A-MOS-TRAS	TQ (°C)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	RLQ (%)	PERDA AO FOGO (%)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	800	12,67±0,24	25,40±0,40	2,00±0,01	0,20±0,36	5,53±0,38	7,79±0,10
	900	12,20±0,16	24,51±0,25	2,01±0,01	0,27±0,14	5,78±0,02	8,15±0,29
	1000	10,65±0,13	22,04±0,21	2,06±0,01	1,24±0,28	5,91±0,13	8,41±0,52
B	800	13,67±0,05	26,82±0,14	1,96±0,00	0,37±0,07	6,53±0,07	6,96±0,72
	900	13,46±0,20	22,80±0,90	1,97±0,14	0,77±0,19	7,05±0,75	7,69±0,88
	1000	12,09±0,61	20,73±0,27	2,02±0,07	2,48±0,20	8,01±0,58	9,00±0,64
C	800	14,03±0,65	27,03±0,88	1,93±0,03	0,69±0,02	5,88±0,47	6,25±0,80
	900	12,43±0,88	24,30±1,70	1,96±0,04	1,57±0,01	6,11±0,13	9,17±0,32
	1000	8,32±0,81	17,41±1,38	2,10±0,04	4,19±0,02	6,52±0,37	9,28±0,97
D	800	11,78±0,97	23,04±0,33	1,96±0,08	0,17±0,12	4,49±0,38	5,52±0,92
	900	11,15±0,32	22,50±0,56	2,02±0,01	0,56±0,21	4,96±0,00	5,82±0,62
	1000	8,39±0,37	17,61±0,62	2,10±0,02	1,79±0,25	5,39±0,84	6,19±0,84
E	800	13,20±0,09	26,04±0,13	1,97±0,00	0,12±0,00	7,00±0,01	7,78±0,54
	900	12,71±0,38	25,20±0,58	1,98±0,01	0,18±0,05	7,32±0,12	9,58±0,29
	1000	9,60±0,38	20,16±0,66	2,10±0,01	2,53±0,23	7,69±0,01	11,02±0,34

TQ = temperatura de queima; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente e RLQ = retração linear de queima.

TABELA 4.7 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa industrial, *extrudados* e secos à temperatura de 110°C.

AMOSTRAS	UMIDADE DE EXTRUSÃO (%)	RETRAÇÃO LINEAR DE SECAGEM (%)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	19,20±0,96	5,63±0,21	5,20±0,94
B	19,89±0,02	4,82±0,32	7,33±0,83
C	19,15±0,27	5,57±0,41	7,74±0,12
D	19,42±0,21	5,60±0,51	5,52±1,02
E	20,27±0,28	5,29±0,25	7,00±0,72

1 MPa \cong 10 kgf/cm²**TABELA 4.8** – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa industrial, *extrudados* e *sinterizados* às temperaturas de 800, 900 e 1000°C.

A-MOSTRAS	TQ (°C)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	RLQ (%)	PERDA AO FOGO (%)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	800	12,59±0,52	24,64±0,85	1,96±0,03	0,84±0,27	8,37±0,29	9,95±0,29
	900	7,94±0,78	15,67±0,75	1,98±0,14	2,18±0,17	8,35±0,76	10,44±0,05
	1000	6,75±0,99	14,16±0,94	2,11±0,15	4,26±0,48	8,97±0,05	11,58±0,98
B	800	13,64±0,59	26,79±0,88	1,97±0,18	0,80±0,14	7,09±0,08	7,52±0,44
	900	11,87±0,70	23,51±0,98	1,98±0,01	1,21±0,15	7,51±0,06	9,88±0,81
	1000	6,81±0,22	14,28±0,69	2,00±0,01	3,87±0,21	7,81±0,04	11,88±0,34
C	800	13,34±0,95	25,08±0,95	1,88±0,02	0,73±0,18	5,93±0,31	10,56±0,88
	900	11,82±0,89	22,61±0,98	1,91±0,03	2,53±0,23	6,02±0,80	11,27±0,78
	1000	7,06±0,87	14,78±0,94	2,10±0,01	5,95±0,52	7,12±0,10	13,72±0,87
D	800	13,39±0,82	24,71±0,58	1,86±0,08	0,61±0,13	5,04±0,22	9,92±0,23
	900	7,85±0,87	15,35±0,99	1,96±0,03	3,03±1,33	5,23±0,01	10,62±0,38
	1000	6,01±0,48	12,24±0,82	2,04±0,03	3,60±0,03	5,69±0,39	11,03±0,12
E	800	16,63±0,31	30,21±0,78	1,82±0,04	0,07±0,01	6,94±0,41	7,85±0,22
	900	14,49±0,59	27,15±0,53	1,87±0,04	0,45±0,07	7,37±0,01	9,94±0,34
	1000	9,53±0,03	19,12±0,08	2,01±0,00	3,40±0,39	7,82±0,03	11,89±0,68

TQ = temperatura de queima; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente e RLQ = retração linear de queima.

TABELA 5.1 – Índices de Atterberg da amostra A aditivada.

SIMB.*	ADITIVO	PORCENTAGEM DE ADITIVO								
		0,5%			1,0%			1,5%		
		LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
A1	Amido Solúvel	34,2	18,7	15,5	35,5	21,6	13,9	36,6	25,2	11,4
A2	Bentonita Cálcica	38,0	20,5	17,5	36,5	20,9	15,6	35,0	21,3	13,7
A3	Bentonita Sódica	32,0	23,7	8,3	36,0	22,6	13,4	35,8	19,0	16,8
A4	Carbonato de Sódio	34,4	20,7	13,7	34,5	20,2	14,3	33,8	19,1	14,7
A5	Carboximetilcelulose	51,0	37,7	13,3	79,5	NP	NP	79,5	NP	NP
A6	Cloreto de Magnésio	34,5	17,6	16,9	36,1	18,2	17,9	32,1	19,2	12,9
A7	Detergente em Pó – ALA	33,5	21,2	12,2	34,0	23,0	11,0	33,5	22,6	10,9
A8	Dextrina Branca	36,2	21,2	14,9	36,7	20,8	15,8	35,7	20,4	15,2
A9	Hexametáfosfato de Sódio	33,2	19,9	13,2	30,7	23,8	6,8	35,7	24,2	11,4
A10	Silicato de Sódio	35,2	17,6	17,5	35,3	18,3	19,9	33,5	19,9	13,6

* simbologia

TABELA 5.2 – Índices de Atterberg da amostra B aditivada.

SIMB.*	ADITIVO	PORCENTAGEM DE ADITIVO								
		0,5%			1,0%			1,5%		
		LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
A1	Amido Solúvel	36,8	19,4	17,4	36,8	16,5	20,4	37,9	19,7	18,2
A2	Bentonita Cálcica	38,1	18,5	19,4	35,5	17,6	17,8	36,6	17,8	18,7
A3	Bentonita Sódica	35,0	18,7	16,3	41,2	19,2	21,9	37,9	17,8	20,1
A4	Carbonato de Sódio	36,3	17,8	18,4	33,4	17,6	15,8	41,0	17,2	23,8
A5	Carboximetilcelulose	71,2	28,8	42,4	101,2	NP	NP	120	NP	NP
A6	Cloreto de Magnésio	32,7	14,9	17,7	31,2	14,9	16,2	32,2	15,3	16,9
A7	Detergente em Pó – ALA	35,8	17,4	18,4	42,7	16,7	26,0	33,7	17,4	16,2
A8	Dextrina Branca	35,3	18,4	16,8	40,2	18,9	21,2	37,2	17,4	19,7
A9	Hexametáfosfato de Sódio	32,0	16,6	15,4	30,8	16,4	14,4	31,0	17,4	13,7
A10	Silicato de Sódio	36,1	17,6	18,4	33,6	17,8	15,8	35,4	17,5	17,8

* simbologia

LL = limite de liquidez, LP = limite de plasticidade e IP = índice de plasticidade.

TABELA 5.3 – Índices de Atterberg da amostra C aditivada.

SIMB.*	ADITIVO	PORCENTAGEM DE ADITIVO								
		0,5%			1,0%			1,5%		
		LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
A1	Amido Solúvel	34,8	17,8	17,0	34,4	16,7	17,7	35,2	17,1	18,1
A2	Bentonita Cálcica	34,0	19,8	14,2	34,4	19,0	15,4	37,2	18,4	18,8
A3	Bentonita Sódica	33,5	18,8	14,7	35,0	18,5	16,5	39,5	20,2	19,3
A4	Carbonato de Sódio	34,0	17,9	16,1	39,4	19,9	19,5	40,6	20,4	20,2
A5	Carboximetilcelulose	42,5	22,9	19,6	61,0	31,9	29,1	78,5	32,5	46,0
A6	Cloreto de Magnésio	36,4	19,9	16,5	35,0	17,6	17,4	34,5	21,9	12,6
A7	Detergente em Pó - ALA	34,0	19,8	14,2	33,8	18,5	15,3	34,4	20,1	14,3
A8	Dextrina Branca	36,8	28,2	8,6	36,0	22,4	13,6	37,0	19,7	17,3
A9	Hexametáfosfato de Sódio	33,0	25,0	8,0	31,5	21,1	10,4	31,2	17,9	13,3
A10	Silicato de Sódio	32,6	24,6	8,0	33,6	20,7	12,7	34,4	18,3	16,1

* simbologia

TABELA 5.4 – Índices de Atterberg da amostra D aditivada.

SIMB.*	ADITIVO	PORCENTAGEM DE ADITIVO								
		0,5%			1,0%			1,5%		
		LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
A1	Amido Solúvel	35,2	18,7	16,5	35,6	18,9	16,7	38,2	19,4	18,8
A2	Bentonita Cálcica	33,0	22,1	10,9	34,6	20,4	14,2	35,4	20,6	14,8
A3	Bentonita Sódica	35,5	21,7	13,8	34,6	24,2	10,4	35,5	19,7	15,8
A4	Carbonato de Sódio	41,0	20,7	20,3	44,0	19,9	24,1	14,6	41,5	26,9
A5	Carboximetilcelulose	68,5	37,5	31,4	95,0	42,4	52,6	82,0	56,4	25,6
A6	Cloreto de Magnésio	34,1	17,6	16,5	34,0	16,2	17,8	33,2	19,6	13,6
A7	Detergente em Pó – ALA	31,8	20,4	11,4	33,4	21,3	12,1	33,0	19,5	13,5
A8	Dextrina Branca	33,9	16,3	17,6	35,0	22,4	12,6	33,6	19,6	14,0
A9	Hexametáfosfato de Sódio	34,6	17,2	17,4	32,6	18,4	14,2	34,6	16,5	18,1
A10	Silicato de Sódio	34,3	19,1	15,2	33,2	19,3	13,9	35,5	17,7	17,7

* simbologia

LL = limite de liquidez, LP = limite de plasticidade e IP = índice de plasticidade.

TABELA 5.5 – Índices de Atterberg da amostra E aditivada.

SIMB.*	ADITIVO	PORCENTAGEM DE ADITIVO								
		0,5%			1,0%			1,5%		
		LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
A1	Amido Solúvel	35,8	19,2	16,6	36,8	19,2	17,6	36,2	17,0	19,2
A2	Bentonita Cálcica	36,4	20,8	15,6	38,2	20,5	17,6	37,2	20,7	14,4
A3	Bentonita Sódica	36,9	20,1	16,8	35,3	20,4	14,9	36,7	22,7	14,0
A4	Carbonato de Sódio	35,3	20,4	14,8	35,7	16,5	19,2	34,1	19,1	14,9
A5	Carboximetilcelulose	46,7	29,5	17,2	60,2	32,4	27,7	70,2	43,1	27,2
A6	Cloreto de Magnésio	36,8	21,4	15,4	36,1	21,7	14,3	36,0	20,3	15,6
A7	Detergente em Pó – ALA	34,4	21,2	13,2	36,2	18,4	17,8	34,3	23,2	11,2
A8	Dextrina Branca	35,9	20,4	15,6	37,7	23,3	14,4	39,4	21,4	17,9
A9	Hexametáfosfato de Sódio	34,9	23,3	11,6	34,1	22,0	12,1	33,3	22,6	10,7
A10	Silicato de Sódio	36,1	20,9	15,2	36,0	23,4	12,7	35,2	21,2	13,8

* *simbologia*

LL = limite de liquidez, LP = limite de plasticidade e IP = índice de plasticidade.

TABELA 5.8 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa aditivada, moldados por *extrusão* e secos à temperatura de 110°C.

AMOSTRAS	% DE ADITIVO POR 100g DE MASSA SECA	UMIDADE DE EXTRUSÃO (%)	RETRAÇÃO LINEAR DE SECAGEM (%)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	0,5%A1	17,71±0,01	6,31±0,42	8,21±0,12
	0,5%A6	15,30±0,19	4,42±0,08	9,66±0,82
	0,5%A9	17,97±0,13	5,51±0,62	11,40±0,04
	0,5%A10	16,39±0,07	4,62±0,45	9,75±1,08
B	1%A1	17,92±0,30	5,24±0,21	10,67±1,81
	0,5%A6	16,47±0,89	4,65±0,59	5,68±0,42
	1%A9	16,32±0,07	3,22±0,22	5,74±0,75
	1,5%A10	16,94±0,94	5,11±0,39	10,15±0,30
C	1%A1	17,89±0,59	5,30±0,78	5,82±0,12
	0,5%A4	18,32±0,01	5,18±0,30	10,08±0,21
	1%A6	16,10±0,02	4,26±0,05	3,52±0,24
	1,5%A9	18,81±0,02	5,01±0,20	10,88±1,52
	1,5%A10	18,20±0,72	5,30±0,23	6,05±0,61
D	1%A6	16,54±0,01	4,61±0,17	10,08±0,61
	1,5%A9	18,46±0,0	5,60±0,15	8,00±0,40
	1,5%A10	18,74±0,01	5,68±0,15	9,17±0,35
E	1,5%A1	15,26±0,17	3,68±0,10	11,48±0,11
	1%A4	16,81±0,14	3,42±0,15	11,55±1,09

ADITIVOS:

A1 = amido solúvel; A4 = carbonato de sódio; A6 = cloreto de magnésio;
A9 = hexametáfosfato de sódio e A10 = silicato de sódio.

TABELA 5.10 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa aditivada *extrudados e sinterizados* à temperatura de 800°C.

A-MOS-TRAS	% DE ADITIVO POR 100g DE MASSA	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	RLQ (%)	PERDA AO FOGO (%)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	0,5%A1	12,02±0,06	23,47±0,13	1,95±0,00	0,44±0,15	6,44±0,03	11,26±0,28
	0,5%A6	10,85±0,23	21,60±0,14	1,99±0,03	0,52±0,33	7,63±0,04	11,34±0,36
	0,5%A9	11,42±0,04	22,44±0,01	1,97±0,01	0,55±0,09	5,98±0,07	13,66±0,24
	0,5%A10	11,32±0,31	22,30±0,01	1,97±0,04	0,49±0,14	5,85±0,07	11,56±0,16
B	1%A1	9,58±0,26	18,53±0,54	1,94±0,00	0,77±0,59	7,61±0,07	17,07±0,82
	0,5%A6	12,40±0,50	24,04±0,84	1,94±0,01	0,66±0,21	6,86±0,05	12,54±0,82
	1%A9	11,32±0,08	21,51±0,01	1,90±0,01	1,19±0,57	7,66±0,72	11,55±0,12
	1,5%A10	11,34±0,09	22,10±0,68	1,95±0,04	0,85±0,15	8,95±0,92	14,59±0,12
C	1%A1	12,48±0,90	23,70±0,99	1,91±0,02	1,20±0,31	7,43±0,10	12,32±0,89
	0,5%A4	10,89±0,49	21,19±0,72	1,95±0,02	0,81±0,14	4,43±0,05	11,30±0,68
	1%A6	12,84±0,12	24,90±0,14	1,94±0,03	0,91±0,14	6,74±0,13	10,07±0,12
	1,5%A9	11,29±0,09	21,50±0,29	1,90±0,00	1,12±0,20	6,00±0,10	10,67±0,52
	1,5%A10	14,47±0,23	27,69±0,13	1,91±0,02	1,28±0,33	6,09±0,11	10,72±0,22
D	1%A6	12,44±0,57	23,87±0,40	1,91±0,05	0,28±0,04	5,00±0,09	9,42±0,19
	1,5%A9	10,55±0,05	20,54±0,11	1,95±0,08	2,61±0,24	5,17±0,13	9,03±0,79
	1,5%A10	11,35±0,16	21,71±0,29	1,91±0,00	0,35±0,09	4,23±0,14	8,44±0,06
E	1,5%A1	11,37±0,95	21,77±0,21	1,92±0,15	0,45±0,13	8,61±0,09	12,38±0,15
	1%A4	13,06±0,85	25,03±0,71	1,92±0,07	2,47±0,37	6,83±0,07	8,49±0,24

A1 = amido solúvel; A4 = carbonato de sódio; A6 = cloreto de magnésio; A9 = hexametáfosfato de sódio; A10 = silicato de sódio; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente e RLQ = retração linear de queima.

TABELA 5.11 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa aditivada, *extrudados e sinterizados* à temperatura de 900°C.

A-MOS-TRAS	% DE ADITIVO POR 100g DE MASSA	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	RLQ (%)	PERDA AO FOGO (%)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	0,5%A1	11,60±0,50	22,46±0,46	1,93±0,04	1,19±0,37	6,55±0,60	13,26±1,13
	0,5%A6	9,86±0,22	19,94±0,88	2,02±0,13	1,26±0,48	8,09±0,14	13,99±0,17
	0,5%A9	10,56±0,07	20,06±0,14	1,90±0,00	1,75±0,91	6,35±0,18	13,69±0,67
	0,5%A10	10,12±0,49	20,64±0,82	1,93±0,01	1,43±0,25	6,44±0,05	15,18±0,10
B	1%A1	8,57±0,09	17,64±0,12	2,06±0,02	1,38±0,08	7,92±0,04	20,62±0,76
	0,5%A6	12,00±0,46	23,66±0,69	1,97±0,02	1,00±0,34	7,21±0,05	15,79±0,17
	1%A9	11,49±0,08	22,69±0,29	1,97±0,01	1,97±0,39	7,36±0,12	12,25±0,21
	1,5%A10	10,73±0,38	21,73±0,54	2,02±0,02	2,05±0,19	9,09±0,19	15,00±0,84
C	1%A1	12,43±0,72	23,31±0,15	1,88±0,02	1,59±0,21	7,79±0,07	13,17±1,29
	0,5%A4	15,32±0,50	28,71±0,68	1,88±0,07	1,89±0,62	6,45±0,04	13,03±0,54
	1%A6	11,02±0,57	21,95±0,97	1,99±0,02	1,33±0,15	7,30±0,33	10,49±0,64
	1,5%A9	10,92±0,16	20,82±0,28	1,90±0,00	1,89±0,13	6,49±0,36	11,44±0,24
	1,5%A10	12,66±0,34	24,28±0,69	1,91±0,00	1,97±0,34	6,71±0,04	11,24±0,46
D	1%A6	11,73±0,17	22,34±0,31	1,90±0,00	0,64±0,07	5,27±0,06	10,36±0,11
	1,5%A9	10,43±0,38	20,08±0,37	1,93±0,03	2,97±0,43	5,33±0,01	10,09±0,52
	1,5%A10	11,58±0,94	21,93±0,68	1,91±0,06	1,43±0,90	6,53±0,41	8,52±0,04
E	1,5%A1	10,35±0,54	19,81±0,99	1,91±0,01	1,22±0,44	8,73±0,05	14,31±0,37
	1%A4	11,48±0,96	22,29±0,85	1,94±0,10	3,14±0,64	7,35±0,07	11,64±0,29

A1 = amido solúvel; A4 = carbonato de sódio; A6 = cloreto de magnésio; A9 = hexametáfosfato de sódio; A10 = silicato de sódio; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente e RLQ = retração linear de queima.

TABELA 5.12 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova com a massa aditivada, *extrudados e sinterizados* à temperatura de 1000°C.

A-MOS-TRAS	% DE ADITIVO POR 100g DE MASSA	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	RLQ (%)	PERDA AO FOGO (%)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	0,5%A1	11,31±0,58	20,90±0,48	1,85±0,05	3,21±0,30	7,32±0,29	13,90±0,15
	0,5%A6	9,56±0,09	17,96±0,96	1,88±0,08	3,11±0,37	8,62±0,50	15,46±1,09
	0,5%A9	9,63±0,10	17,44±0,59	1,81±0,01	3,64±0,59	6,46±0,15	17,68±0,10
	0,5%A10	10,48±0,34	18,92±1,75	1,80±0,10	3,15±0,66	6,60±0,15	18,68±0,50
B	1%A1	9,62±0,27	16,93±0,68	1,76±0,13	3,79±0,42	8,67±0,67	22,74±0,81
	0,5%A6	8,28±0,64	16,67±0,96	1,94±0,96	3,10±0,57	7,46±0,11	16,52±0,45
	1%A9	8,71±0,12	17,04±0,39	1,96±0,02	4,60±0,26	8,20±0,46	15,16±0,02
	1,5%A10	7,60±0,54	15,16±0,50	2,10±0,04	4,34±0,70	9,14±0,45	17,24±0,88
C	1%A1	8,11±0,21	15,82±0,47	1,95±0,01	4,36±0,51	8,21±0,16	14,04±1,22
	0,5%A4	7,47±0,25	15,17±0,45	2,03±0,01	3,48±0,76	6,60±0,14	11,75±0,76
	1%A6	9,38±0,31	18,46±0,69	1,97±0,01	3,26±0,61	7,51±0,06	11,52±0,82
	1,5%A9	9,85±0,44	19,64±0,82	1,99±0,00	4,52±0,36	6,90±0,13	12,05±0,46
	1,5%A10	9,52±0,36	18,59±0,93	1,95±0,02	4,07±0,34	7,06±0,08	12,03±0,52
D	1%A6	10,42±0,50	20,23±0,50	1,94±0,04	2,66±0,04	5,39±0,04	11,72±0,97
	1,5%A9	8,89±0,14	17,65±0,13	1,99±0,02	3,31±0,29	5,54±0,04	11,05±0,52
	1,5%A10	8,94±0,23	17,83±0,30	1,99±0,02	2,51±0,33	6,88±0,80	9,16±0,12
E	1,5%A1	10,68±0,37	16,51±0,39	1,55±0,02	2,85±0,45	9,34±0,08	15,86±0,08
	1%A4	8,23±0,85	16,26±0,68	1,97±0,00	3,49±0,80	7,81±0,13	14,09±0,22

A1 = amido solúvel; A4 = carbonato de sódio; A6 = cloreto de magnésio; A9 = hexametáfosfato de sódio; A10 = silicato de sódio; PA = porosidade aparente; MEA = massa específica aparente e RLQ = retração linear de queima.

TABELA 6.1 – Valores das características físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos industrializados.

AMOSTRAS	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)
A	8,97±0,18	1,96±0,52
B	9,21±0,80	1,96±0,27
C	10,57±0,95	2,26±0,58
D	9,51±0,14	1,67±0,48
E	12,65±0,14	0,52±0,20
ESPECIFICAÇÃO*	8 a 25	1,0 (mínimo)

* NBR 7171(1992)

TABELA 6.2 – Propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova retirados dos blocos cerâmicos industrializados.

AMOSTRAS	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	POROSIDADE APARENTE (%)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm³)	TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO (MPa)
A	10,88±0,28	21,43±0,50	1,97±0,01	6,32±0,65
B	8,30±0,21	17,16±0,37	2,06±0,01	10,38±0,82
C	8,44±0,18	17,16±0,24	2,03±0,04	7,35±0,97
D	11,02±0,75	21,58±0,98	1,96±0,03	9,03±0,86
E	14,47±0,24	26,88±0,98	1,86±0,05	5,40±0,95

ANEXO II

Relação das indústrias cerâmicas que forneceram material para a pesquisa

A – Cerâmica Cincera

Proprietário: Sindolfo Santiago
Endereço: Av. Juarez Távora, 729 – Centro
Telefone: (0xx83) 3229-1017
58300-410 – Santa Rita – Paraíba
Bacia Hidrográfica: Rio Paraíba

B – Cerâmica Espírito Santo

Proprietário: Newton Luiz Gonçalves da Silva Jr.
Endereço: Rodovia PB 04
Telefone: (0xx83) 3254-1172
58337-000 – Cruz do Espírito Santo – Paraíba
Bacia Hidrográfica: Rio Paraíba

C – Cerâmica João Ribeiro

Proprietário: João Ribeiro
Massaranduba – Paraíba
Bacia Hidrográfica: Médio Paraíba

D – Cerâmica Jardim

Proprietária: Rosineide Macêdo de Oliveira Moura
Endereço: Sítio Jardim – Zona Rural
Telefone: (0xx83) 3288-1028
58337-000 – Mulungú – Paraíba
Bacia Hidrográfica: Rio Mamanguape

E – Cerâmica Barra

Proprietário: Welisson & Kelma
Endereço: BR 230 – Km 246
Telefone: (0xx83) 3504-1028
58337-000 – Juazeirinho – Paraíba
Bacia Hidrográfica: Rio Taperoá