

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo da formulação de massas cerâmicas provenientes da
região do Seridó-RN para fabricação de telhas**

FELIPE LIRA FORMIGA ANDRADE

Orientador: Dr. Eng. Carlos Alberto Paskocimas
Co-Orientador: Dr. Eng. Rubens Maribondo do Nascimento

Natal
2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA FORMULAÇÃO DE MASSAS CERÂMICAS
PROVENIENTES DA REGIÃO DO SERIDÓ-RN PARA
FABRICAÇÃO DE TELHAS**

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
como parte dos requisitos para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE LIRA FORMIGA ANDRADE

Dr. Eng. CARLOS ALBERTO PASKOCIMAS

Natal, Março de 2009

Divisão de Serviços Técnicos

Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Andrade, Felipe Lira Formiga.

Estudo da formulação de massas cerâmicas provenientes da região do Seridó-RN para fabricação de telhas / Felipe Lira Formiga Andrade. – Natal, RN, 2009.

100 f.

Orientador: Carlos Alberto Paskocimas.

Co-orientador: Rubens Maribondo do Nascimento.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Cerâmica vermelha – Dissertação. 2. Argilas – Dissertação. 3. Formulações de massa – Dissertação. 4. Telha cerâmica – Dissertação. I. Paskocimas, Carlos Alberto. II. Nascimento, Rubens Maribondo do. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 666.3(043.3)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA FORMULAÇÃO DE MASSAS CERÂMICAS
PROVENIENTES DA REGIÃO DO SERIDÓ-RN PARA
FABRICAÇÃO DE TELHAS**

FELIPE LIRA FORMIGA ANDRADE

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

Dr. Eng. Carlos Alberto Paskocimas (UFRN) - Presidente

BANCA EXAMINADORA

Dr. Eng. Rubens Maribondo do Nascimento (UFRN) – Examinador Interno

Dr. Eng. Marcus Antônio de Freitas Melo (UFRN) – Examinador Externo ao Programa

Dr. Eiji Harima (CEFET-RN) – Examinador Externo à Instituição

*“A Cavalaria não vai chegar! Você precisa se virar,
Concentre-se no trabalho, trabalho, trabalho,
Seja voluntário em tudo, todos os dias,
Aqueles que ficam milionários são os que não têm o dinheiro como fim.”*

(Christopher P. Gardner)

Dedico aos meus queridos pais,
Osmar Formiga e Lucimar Lira.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à DEUS, pois ele é quem proporciona oportunidades para que eu consiga conquistar as alegrias em minha vida;

À MINHA MÃE E MEU PAI, pois criaram condições para seus filhos a conquistar a principal virtude do homem, que é o conhecimento.

AOS MEUS IRMÃOS E A MINHA NAMORADA SÍLVIA, que sempre torceram pelo meu sucesso;

AOS FAMILIARES, vó, tias, tios, primos, primas, que participaram do meu desenvolvimento e com os quais compartilhei experiências inesquecíveis durante a minha vida;

A SR. ROBERTO E SRA. MARIA LUIZA, que sempre me apoiaram e me incentivaram no caminho trilhado;

AOS AMIGOS ACADÊMICOS e TODOS QUE COMPÕEM O LABORATÓRIO DE MATERIAIS CERÂMICOS, Leonardo Pansard, Márcio Varela, Ricardo Peixoto, Jaquélia Brito, Pedro Alighery, Rannier Marques, Laurênia Martins, José Carlos, Rosanne de Lima, Wagner Araújo; Jean Carlos, Daniel Araújo e Beatriz Cela;

AO PROFESSOR PASKOCIMAS, pela confiança, otimismo e orientação concedida durante a elaboração e execução desse trabalho;

AO PROFESSOR RUBENS, pelo estímulo, confiança, ensinamentos e oportunidade concedida;

AO PROFESSOR MARTINELLI, por ser fonte de inspiração;

A TODOS QUE COMPÕEM O PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, pelas contribuições, ensinamentos, orientações e parcerias.

AO CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO, E AO INSTITUTO EUVALDO LODI-RN, pelo auxílio financeiro fornecido durante a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	11
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE TABELAS	15
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	16
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. O SEGMENTO DE CERÂMICA VERMELHA	19
2.2. MATÉRIA-PRIMA	23
2.2.1. FRAÇÃO ARGILOSA	24
2.2.2. FRAÇÃO NÃO-ARGILOSA	26
2.3. PROCESSO PRODUTIVO	28
2.3.1. PREPARAÇÃO DA MASSA	29
2.3.2. EXTRUSÃO	31
2.3.3. SECAGEM	35
2.3.4. QUEIMA	38
2.4. TELHAS CERÂMICAS	42
2.5. POLO CERÂMICO DO SERIDÓ	45
CAPÍTULO 3. MATÉRIAIS E MÉTODOS	48
3.1. ENSAIOS PRELIMINARES	49
3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	50
3.2. FORMULAÇÃO DAS MASSAS	54
3.3. CURVAS DE QUEIMA E PROPRIEDADES MECÂNICAS	56
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO FINAL	59
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1. CARACTERÍSTICAS DA CADEIA PRODUTIVA	62
4.1.1. MERCADO CONSUMIDOR	68
4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	68
4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	68
4.2.2. AVALIAÇÃO DA PLASTICIDADE	71
4.2.3. ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA	72
4.2.4. ANÁLISE TÉRMICA	76

4.3. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS FORMULAÇÕES	77
4.3.1. PERDA DE MASSA AO FOGO	77
4.3.2. CURVAS DE QUEIMA	79
4.3.3. POROSIDADE APARENTE	83
4.3.4. MASSA ESPECÍFICA APARENTE	85
4.3.5. CARGA DE RUPTURA	88
4.3.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	90
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES	94
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS	98

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar comparativamente as características e propriedades tecnológicas de massas cerâmicas para telhas da região do Seridó-RN. A Região em estudo possui 23 municípios onde foram identificadas 80 indústrias cerâmicas. Para definição do universo da pesquisa, fez-se um levantamento das olarias que fazem parte da APL Seridó junto ao IEL do Estado. As características e condições de funcionamento das indústrias cerâmicas da região foram identificadas através de um questionário sócio-econômico aplicado in loco, que abordava aspectos como: perfil das empresas, processo produtivo etc. A análise das informações coletadas em 23 empresas identificadas em sete municípios permite concluir que a grande maioria das indústrias é de pequeno porte, com estrutura familiar, equipamentos obsoletos e mão-de-obra pouco qualificada. Grande parte das olarias opera com baixo conhecimento técnico, precários controles do processo produtivo e tecnológico dos produtos. As matérias-primas coletadas foram submetidas a ensaios de difração de raios X, composição química, análise térmica, distribuição de tamanho de partículas e plasticidade. Em seguida foram produzidas cinco formulações e confeccionados corpos-de-prova por prensagem uniaxial a 25 MPa para queima variando de 850 °C a 1050°C. As propriedades tecnológicas de queima avaliadas foram: perda de massa ao fogo, retração linear, massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água e carga de ruptura à flexão (3 pontos). Os resultados indicaram que as matérias-primas provenientes da região apresentam significativas semelhanças quanto à composição química e mineralógica. Além disso, indica-se a possibilidade da utilização de ciclos de queima mais rápidos e eficientes que os atuais, limitando algumas massas argilosas para certas condições de queima.

Palavras-chaves: cerâmica vermelha, argilas, formulações de massa, telha cerâmica.

ABSTRACT

This work has for objective study compared the characteristics and technological properties of ceramic bodies from the region of Seridó-RN. The region under study has identified 23 cities where there were 80 ceramics industries. To define the universe of search, there was a survey of pottery that are part of APL Seridó next to the IEL. The characteristics and operating conditions of ceramics industries of the region were identified through a socio-economic questionnaire applied locally, which addressed issues such as: profiles of companies, production process etc. The analysis of information collected from 24 companies identified in seven cities shows that the vast majority of industries is small, with family structure, obsolete equipment and labor, little qualified. Most of the pottery works with low technical knowledge, poor control of the production process and product technology. The raw collected were submitted to analysis of X ray diffraction, chemical composition, termical analysis, particle size distribution and plasticity. Then were produced five formulations and made by uniaxial pressure at 25 MPa for firing in temperatures varying from 850 to 1050 °C. The firing technological properties evaluated were: mass loss to fire, lineal shrinkage, apparent density, apparent porosity, water absorption and flexural strength (3 points). The results indicated that the raw materials from the region have significant similarities in the composition chemical and mineralogical. Furthermore, it indicates the possibility of the use of cycles of firing faster and efficient than the current, limited to some clay mass burning of certain conditions.

Key words: red pottery, clay, formulations of ceramic body, roofing tile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais regiões e municípios com indústrias cerâmicas em atividade_	22
Figura 2.2 – Estrutura dos principais argilominerais (DUTRA, 2007) _____	26
Figura 2.3 – Diagrama das transformações alotrópicas do quartzo _____	27
Figura 2.4 – Sala de máquinas de preparação e extrusão com dupla laminação (BONFANTI, 2008) _____	31
Figura 2.5 – Corte de uma extrusora de dupla hélice, com o respectivo gráfico de pressões exercidas no seu interior e a identificação das diferentes zonas _____	32
Figura 2.6 – Variação da pressão de extrusão e da potência exercida pelo motor em função do teor de umidade, para uma massa plástica e para outras menos plástica (RIBEIRO, 2003) _____	34
Figura 2.7 – Variação da retração de secagem em função da água de conformação, curva de Bigot (VIEIRA, 2003) _____	36
Figura 2.8 – Representação esquemática da secagem do sistema argila-água _____	37
Figura 2.9 – Diagrama de equilíbrio $\text{Al}_2\text{O}_3\text{.SiO}_2\text{.K}_2\text{O}$ (ALPER, 1995) _____	38
Figura 2.10 – Representação comparativa das propriedades tecnológicas das amostras submetidas aqueima com lenha e gás natural (LOPES, 2006) _____	41
Figura 2.11 – Massa específica aparente das amostras (LOPES, 2006)_____	42
Figura 2.12 – Aptidão das massas de cerâmica vermelha segundo a composição granulométrica, conforme diagrama de Winkler (PRACIDELLI, 1997) _____	43
Figura 2.13 – Principais tipos de telhas com suas características principais _____	44
Figura 2.14 – Seridó norte-rio-grandense, Região em Estudo _____	45
Figura 2.15 – Mapa geomorfológico da região do Seridó-RN _____	46
Figura 2.16 – Percentual de produtos fabricados pelas indústrias _____	47
Figura 3.1 – Representação esquemática do procedimento experimental da caracterização das matérias-primas _____	50
Figura 3.2 – Diagrama do funcionamento do aparelho de Casagrande _____	51
Figura 3.3 – Procedimento experimental e caracterização das massas formuladas _____	55
Figura 3.4 – Modelo de curva de queima (SANCHEZ, 2002) _____	57
Figura 4.1 – Jazida Bulhões em Acari _____	61
Figura 4.2 – Jazida Cauaçu em Cruzeta _____	62
Figura 4.3 – Descanso da matéria-prima no pátio das indústrias _____	63

Figura 4.4 – Tempo médio de descanso da massa para homogeneização da distribuição da umidade	63
Figura 4.5 – Número de argilas usadas na composição da massa cerâmica	64
Figura 4.6 – Equipamentos usados na preparação da massa pré-conformação	65
Figura 4.7 – Maromba à vácuo + cortadores	65
Figura 4.8 – Tempo médio de secagem (a) no pátio e (b) nos galpões	66
Figura 4.9 – Processo de secagem (a) no pátio e (b) nos galpões	66
Figura 4.10 – Forno intermitente tipo caipira	67
Figura 4.11 – Estoque de lenha no pátio da empresa	67
Figura 4.12 – Tipos de lenhas utilizadas pelas empresas da região	67
Figura 4.13 – Curva granulométrica das matérias-primas em estudo	68
Figura 4.14 – Diagrama granulométrico de Winkler	70
Figura 4.15 – Diagrama ternário do sistema $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}$	73
Figura 4.16 – Diagrama ternário do sistema $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{CaO} + \text{MgO}$	73
Figura 4.17 – Difractograma das matérias-primas	75
Figura 4.18 – Curva térmica diferencial das matérias-primas	76
Figura 4.19 – Comparação da variação da PF para as formulações M1 e M2	77
Figura 4.20 – Comparação da variação da PF para as formulações M3 e M4	78
Figura 4.21 – Variação da PF para a formulação M5	78
Figura 4.22 – Comparação RLq para as formulações M3, M4 e M5	80
Figura 4.23 – Curvas de gresificação das formulações M2-D, M2-F, M3-G, M4-E, M4-F e M5-C	82
Figura 4.24 – Comparação da variação da PA para as formulações M1 e M2	83
Figura 4.25 – Comparação da variação da PA para as formulações M3 e M4	84
Figura 4.26 – Variação da PA para a formulação M5	85
Figura 4.27 – Fotografia dos corpos-de-prova sinterizados a 850, 950 e 1050°C	87
Figura 4.28 – Fotografia dos corpos-de-prova M4-G (100% A5) sinterizados a 1050°C sob taxa de aquecimento de 10°C/min	88
Figura 4.29 – Comparação da variação da CR para as formulações M1 e M2	89
Figura 4.30 – Comparação da variação da CR para as formulações M3 e M4	89
Figura 4.31 – Variação da CR para a formulação M5	89
Figura 4.32 – Micrografias obtidas por MEV das amostras M1-D, M1-E e M1-F, sinterizada a 950 °C, com 500x de ampliação	90

Figura 4.33 – Micrografias obtidas por MEV da amostra M1-C, sinterizada a 950 °C, com 500x de ampliação	91
Figura 4.34 – Micrografias obtidas por MEV das amostras M4-F, sinterizada a 850, 950 e 1050 °C, com ampliação de 500x, 1000x e 2400x, respectivamente	92
Figura 4.35 – Micrografias obtidas por MEV das amostras M1-D e M1-E, sinterizada a 950 °C, com 1000x de ampliação	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Matéria-prima utilizada e características do processo de fabricação da indústria cerâmica vermelha (ZANDONADI, 1998) _____	23
Tabela 2.2 – Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha _____	43
Tabela 3.1 – Amostra adotada para o trabalho e localização na Região Seridó _____	49
Tabela 3.2 – Formulação das matérias-primas das indústrias _____	54
Tabela 3.3 – Misturas utilizadas para a formulação das massas _____	54
Tabela 3.4 – Variáveis de queima das massas cerâmicas_____	56
Tabela 4.1– Classificação das matérias-primas, segundo NBR 6502, 1995 _____	69
Tabela 4.2 – Distribuição de tamanhos, e diâmetro médio de partículas das matérias-primas _____	70
Tabela 4.3 – Limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade, classificação e tipo de matérias-primas _____	71
Tabela 4.4 – Composição química das argilas, obtidos por fluorescência de raios X _	72
Tabela 4.5 – Análise racional das matérias-primas _____	74
Tabela 4.6 – Retração linear de queima das formulações M1, M2 e M3 _____	79
Tabela 4.7 – Retração linear de queima das formulações M4, e M5 _____	79
Tabela 4.8 – Absorção de água das formulações M1, M2 e M3 _____	81
Tabela 4.9 – Absorção de água das formulações M4, e M5 _____	81
Tabela 4.10 – Massa específica aparente das formulações M1, M2 e M3 _____	85
Tabela 4.11 – Massa específica aparente das formulações M4 e M5_____	86

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA - Absorção de água

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

APL – Arranjo produtivo local

AG - Análise granulométrica

CPs - Corpos-de-prova

CRF – Carga de ruptura à flexão

D₁₀ - Diâmetro no qual 10% das partículas estão abaixo dele

D₆₀ - Diâmetro no qual 60% das partículas estão abaixo dele

D₉₀ - Diâmetro no qual 90% das partículas estão abaixo dele

D_M - Diâmetro médio das partículas

DRX - Difração de raios X

DTA - Análise térmica diferencial

FRX - Fluorescência de raios X

IP - Índice de plasticidade

LL - Limite de liquidez

LP - Limite de plasticidade

MEA - Massa específica aparente

NBR – Norma brasileira

PA - Porosidade aparente

PT - Propriedades tecnológicas

RLq - Retração linear após a queima

RN - Rio Grande do Norte

TRF - Tensão de ruptura à flexão

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Os estudos de matérias-primas argilosas empregadas nas indústrias de cerâmica vermelha estrutural têm como meta a busca de informações que possam auxiliar no desenvolvimento de produto e processos. O resultado poderá ser refletido através da obtenção de produtos de melhor qualidade, seja por mudanças nas formulações das misturas, seja por melhorias no processo de fabricação, através do controle das propriedades das matérias-primas.

A importância da busca do conhecimento sobre as matérias-primas argilosas, e sua relação com a qualidade dos produtos, pode ser confirmada pela grande quantidade de material científico disponível que concentram estudos em argilas encontradas em grandes pólos de produção cerâmica vermelha, como a região de Campos dos Goytacazes no Rio de Janeiro, Santa Gertrudes em São Paulo e algumas regiões do nordeste brasileiro.

Em alguns casos, o alvo dos trabalhos é a avaliação das características de argilas coletadas em uma mesma jazida, considerando posições e profundidades de extração, em outros, foram consideradas argilas com características bastante diferenciadas, oriundas de diferentes jazidas situadas em locais próximos. Para todos os casos, a metodologia de caracterização das argilas foram quanto a sua composição química, mineralógica, distribuição granulométrica, comportamento térmico e análise das propriedades físico-mecânicas após aquecimento.

Os resultados obtidos neste trabalho foram empregados como base de pesquisa para o projeto APL de Telha Cerâmica do Seridó com objetivo de fortalecer a competitividade da indústria de telha da região, por meio da melhoria da gestão empresarial, com propostas das diversas possibilidades de misturas de argilas para composição de massas mais adequadas aos processos utilizados na confecção das peças cerâmicas. Procurou-se avaliar a adequação de uma mistura levando em consideração a composição química e o critério granulométrico como forma de levar as formulações de argilas às condições ideais de processamento, considerando que esta classificação faz uma associação indireta com a composição mineralógica do material.

A formulação utilizada para obtenção da massa nas indústrias cerâmicas é composta de duas ou mais argilas com características específicas, matéria-prima esta

obtida da extração em jazidas próprias ou compradas de terceiros. O balanço entre as argilas que compõem uma formulação deve ser analisado da melhor forma possível. Excesso de material plástico dificulta a moldagem das peças em virtude do seu elevado grau de aderência, tornando o processo inviável; para reduzir esse efeito é necessário introduzir a massa argila com maior teor de impurezas misturadas aos argilominerais facilitando o processo de fabricação através de um processo adequado de mistura, a fim de se obter uma massa homogênea.

De acordo com CARVALHO, 2001, o setor de cerâmica estrutural do Rio Grande do Norte quantificava cerca de 160 indústrias em atividade, localizado em 39 municípios, produzindo cerca de 83.000.000 peças/mês, empregando diretamente mais de 5.000 trabalhadores.

Com o objetivo de estudar diferentes formulações de massa desenvolvidas para as indústrias cerâmicas da Região do Seridó-RN para a produção de telhas, utilizaram-se percentuais diferentes de argilas plásticas e não-plásticas das próprias empresas a fim de verificar a viabilidade do uso das mesmas. Além dos parâmetros de localização das jazidas, a caracterização das matérias-primas foi um fator utilizado para estabelecer os parâmetros de formulação.

Dentro deste contexto, a pesquisa foi programada para cumprir uma etapa experimental capaz de seguir objetivos específicos, como:

- Levantamento do panorama sócio-econômico das indústrias da região, revelando as características e condições de funcionamento, identificadas através de um questionário aplicado *in loco*.
- Caracterizar matérias-primas argilosas utilizadas, a fim de identificar as propriedades físicas e químicas destes materiais e selecioná-las para serem submetidas a diferentes ciclos de queima.
- Desenvolver diferentes ciclos de queima com variação na temperatura final de queima a fim de verificar a viabilidade e adequação das variáveis de queima na qualidade dos produtos finais.
- Comparar propriedades tecnológicas e microestruturais dos produtos conformados por prensagem, submetidos aos diferentes ciclos de queima.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo faz uma revisão dos principais assuntos referente ao tema do trabalho, tais como características gerais, matérias-primas utilizadas, o processo produtivo, principais produtos da indústria de cerâmica vermelha e o panorama completo do pólo cerâmico da região do Seridó do Rio Grande do Norte, setor alvo do estudo.

2.1. O SEGMENTO DE CERÂMICA VERMELHA

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica – (ABC, 2006), o Brasil possui cerca de 5.500 unidades produtoras no setor de cerâmica estrutural, gerando cerca de 400 mil empregos diretos, produção aproximada de 65 milhões de toneladas/ano e com faturamento anual estimado em R\$ 6 bilhões. Este perfil leva a um consumo de aproximadamente 15 milhões de tonelada/ano de argila, principal matéria-prima da indústria cerâmica vermelha.

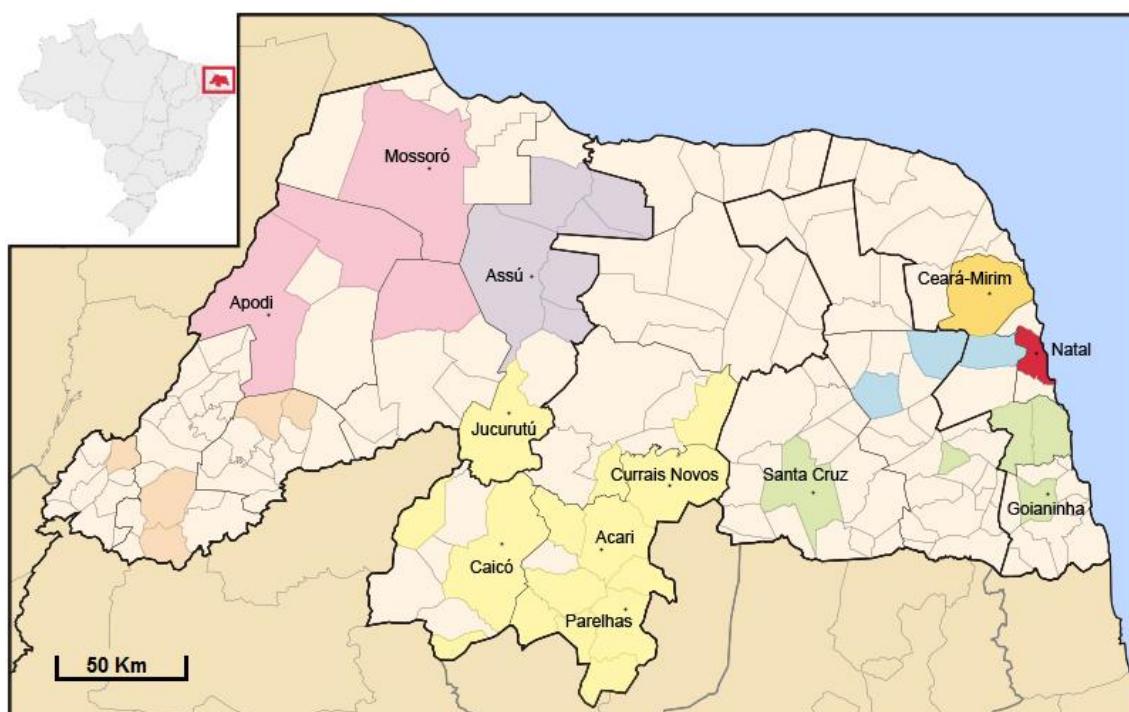
De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, a indústria de cerâmica estrutural é classificada como uma indústria de transformação inserida no ramo de atividades denominado *transformação de materiais não-metálicos* (PAULETTI, 2001).

A indústria de cerâmica vermelha fornece produtos como blocos de vedação e estrutural, telhas, tijolos, lajotas, tubos e outros produtos menos comuns, representando em conjunto com a indústria de cerâmica branca, indústria de revestimento, cimento, vidro e cal, o complexo industrial de materiais cerâmicos tradicionais, utilizados pela cadeia da construção civil (DUTRA, 2007).

Mesmo apresentando este aparente panorama favorável, a indústria de cerâmica vermelha em geral, apresenta vários problemas associados a uma tecnologia antiga, desenvolvida na década de 1950 e 1960 (ZANDONADI, 1996), além de uma grande instabilidade econômica e falta de gerenciamento. Tais fatores caracterizam a indústria de cerâmica estrutural pela elevada produção e baixa produtividade, baixo valor agregado, alto índice de produtos não conformes, pouco controle ambiental e emprego de mão de obra com baixíssimo nível de qualificação (BEZERRA, 2005). A produtividade média no setor encontra-se na faixa de 12 mil peças/operário. mês, enquanto o padrão europeu tem-se algo em torno de 200 mil peças/operário.mês

(PEÇANHA, 2006). Somente a partir da década de 1990 com o surgimento do Programa da Qualidade da Construção Habitacional – QUALIHAB que iniciaram os programas de certificação das empresas, produtos e serviços no setor.

No estado do Rio Grande do Norte existe cerca de 160 empresas em plena atividade, localizadas em 39 municípios, conforme representado na Figura 2.1. Essas empresas estão distribuídas em 8 regiões, das quais 6 localizam-se em bacias de grandes rios (Ceará-Mirim, Potengi, Trairi/Jacu, Curimatau, Baixo Açu e Seridó), além das empresas da chapada do Apodi e da região do extremo oeste potiguar, de cujos vales são extraídas as matérias-primas para fabricação dos produtos (CARVALHO, 2001).



Regiões	Indústrias em Atividade
Bacia do Rio Ceará-Mirim	01
Bacia do Potengi	14
Bacia do Trairi/Jacu	13
Bacia do Curimatau	01
Baixo Açu	36
Bacia do Seridó	79
Chapada do Apodi	10
Oeste Potiguar	05

Figura 2.1. Principais regiões e municípios com indústrias cerâmicas em atividade.

A principal forma jurídica atual das empresas é de sociedade limitada, seguida de firmas individuais, associações e cooperativas, além de algumas que ainda se mantêm na informalidade.

2.2. MATÉRIA-PRIMA

A matéria-prima empregada na composição de massa para fabricação de cerâmica vermelha pode ser agrupada em dois grupos: matérias-primas plásticas e não-plásticas (MOTTA, 2001). Embora ambas exerçam funções ao longo de todo o processo produtivo, as plásticas são essenciais na fase de conformação, enquanto as não-plásticas atuem principalmente durante o processamento térmico.

A Tabela 2.1 alia os principais produtos usados na indústria de cerâmica vermelha e as respectivas matérias-primas utilizadas, bem como algumas características técnicas do processo.

Tabela 2.1. Matéria-Prima utilizada e características do processo de fabricação da indústria de cerâmica vermelha (ZANDONADI, 1998).

SETOR	PRODUTOS	MATÉRIAS-PRIMAS									Moagem	Conformação				Temperatura de Queima (°C)				
		Plástica			Não-Plástica							Extrusão	Tornearia	Prensagem	Colagem	800	900	1000	1100	
		Argila Comum	Argila Plástica	Caulim	Feldspato	Filito	Talco	Calcário	Quartzo	Outros										
Cerâmica Vermelha	Blocos, Lajes	P	P								P									
	Telha	P	P		O						P		P							
	Outros	P	P						O		P									

P - Processo ou Composição Principal (>20%) O - Processo ou Composição ocasional

As argilas fazem parte dos chamados *minerais industriais* formadas pelo grupo dos silicatos e que devido a sua grande diversidade e a presença de numerosos tipos de minerais é a matéria-prima mais utilizada pela indústria de cerâmica vermelha. Do ponto de vista mineralógico, a argila se caracteriza por se constituírem em grande parte de minerais específicos, denominados argilominerais, acompanhados normalmente de outros materiais e minerais associados tais como quartzo, feldspatos, micas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, carbonatos, matéria orgânica, dentre outros.

Os constituintes das argilas podem ser divididos em dois grupos de características distintas: um de fração argilosa, constituído pelos argilominerais que proporcionam característica plástica ao material; e uma fração não-argilosa, formada pelos minerais acessórios, proporcionando à argila característica não-plástica (DEER, 1992).

Uma das principais propriedades das argilas é a plasticidade, esta associada à formação de filmes de água, de certa espessura, à volta das partículas argilosas, que atua como filme lubrificante. Estes filmes de água adsorvida parecem ter uma estrutura induzida pela superfície com a qual estão em contato, gerando uma continuidade estrutural entre todas as partículas, que confere ao sistema simultaneamente, certo grau de rigidez e certa facilidade de deformação (RIBEIRO, 2004). Outras características observadas por essa interação é a resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação, tixotropia e viscosidade de suspensões aquosas que explica sua grande variedade de aplicações tecnológicas.

O comportamento reológico das argilas é fortemente influenciado pelas combinações destas duas frações, assim como as alterações físicas e químicas durante a etapa final do processo. Por exemplo, uma argila com uma fração majoritária de minerais argilosos, comparativamente a fração de minerais acessórios, tende a apresentar uma elevada plasticidade, bem como, granulometria muito fina e elevada reatividade química e sinterabilidade. Inversamente, uma argila com predominância da fração de minerais acessórios, apresenta menor plasticidade, grãos mais grossos com formas arredondadas, menor superfície específica e elevada estabilidade térmica (PRACIDELLI, 1997).

2.2.1. FRAÇÃO ARGILOSA

A maior parcela do corpo cerâmico normalmente é constituída da fração argilosa, que na maioria das vezes transforma-se em um material cristalino após o processo de queima. Como citado anteriormente, esta tem a função de proporcionar moldabilidade à massa, de aumentar a plasticidade, atuar como agente de suspensão em meio aquoso e conferir coesão e solidez à massa verde, sendo responsável pela retração na secagem e elevada resistência mecânica depois de queimada.

Os argilominerais presentes na fração argilosa são filosilicatos hidratados que apresentam cristais micrométricos (4-8 µm) com estrutura lamelar hexagonal, os quais sob aquecimento perdem água absorvida e constitucional e a altas temperaturas produzem materiais altamente refratários (DUTRA, 2007). Possui estruturas formadas por camadas de componentes com coordenações tetraédricas e octaédricas de átomos ou íons de oxigênio e de íons hidroxila com pequenos cátions ao redor, principalmente Si^{4+} e Al^{3+} . As ordens das camadas e o espaçamento entre elas é o que determina o tipo de argilomineral, como também as substituições que podem ocorrer, dentro da estrutura, como por exemplo, o alumínio por magnésio ou ferro, e do silício por alumínio ou ferro, principalmente, e consequente neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions (SOUZA SANTOS, 1989).

Os principais grupos de argilominerais são:

- Grupo da caulinita: deste grupo o argilomineral mais comum é a caulinita, a qual possui estrutura bilaminar, composta por uma capa tetraédrica SiO_4 e uma octaédrica $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, tipo 1:1 (Figura 2.2), podendo ocorrer substituições de Si^{4+} por Al^{3+} no tetraedro e de Al^{3+} por Fe^{2+} e/ou Mg^{2+} no octaedro. Seu emprego como único componente de massa para confecção de produtos da indústria de cerâmica vermelha não é adequado, sobretudo, devido ao seu comportamento refratário durante a queima o que dificulta a obtenção do nível de porosidade especificado. Normalmente estas possuem pouca plasticidade, maior tendência de formar mulita e maior velocidade de secagem da peça. Os outros minerais do grupo da caulinita são: a nacrita, a diquita e a haloisita, este último tem duas formas distintas, uma com a composição da caulinita e outra derivada da caulinita por desidratação com perda de duas moléculas de água.
- Grupo das esmectitas: os argilominerais deste grupo são constituídos por três camadas, sendo duas tetraédricas e uma octaédrica do tipo 2:1 (Figura 2.2). São classificadas de acordo com a localização e os tipos de cátions presentes na estrutura cristalina. Quando todos esses sítios são ocupados por cátions, o filossilicato é chamado trioctaédrico, quando somente dois terços são ocupados por cátions, trata-se de um filossilicato dioctaédrico. O principal argilomineral desse grupo é a montmorilonita, a qual apresenta como principal característica a capacidade de absorver moléculas de água, produzindo uma marcante dilatação de sua estrutura (BARBA, 1997).

- Grupo das ilitas: também denominadas de minerais micáceos ou mica hidratada, o argilomineral ilita apresenta uma estrutura cristalina semelhante à da montmorilonita, a diferença é que existe uma substituição maior do alumínio por silício (SOUZA SANTOS, 1989). Como consequência desta substituição, as camadas estruturais são rigidamente ligadas e não se expandem, tendo distância interplanar basal de 10 Å (DUTRA, 2007).

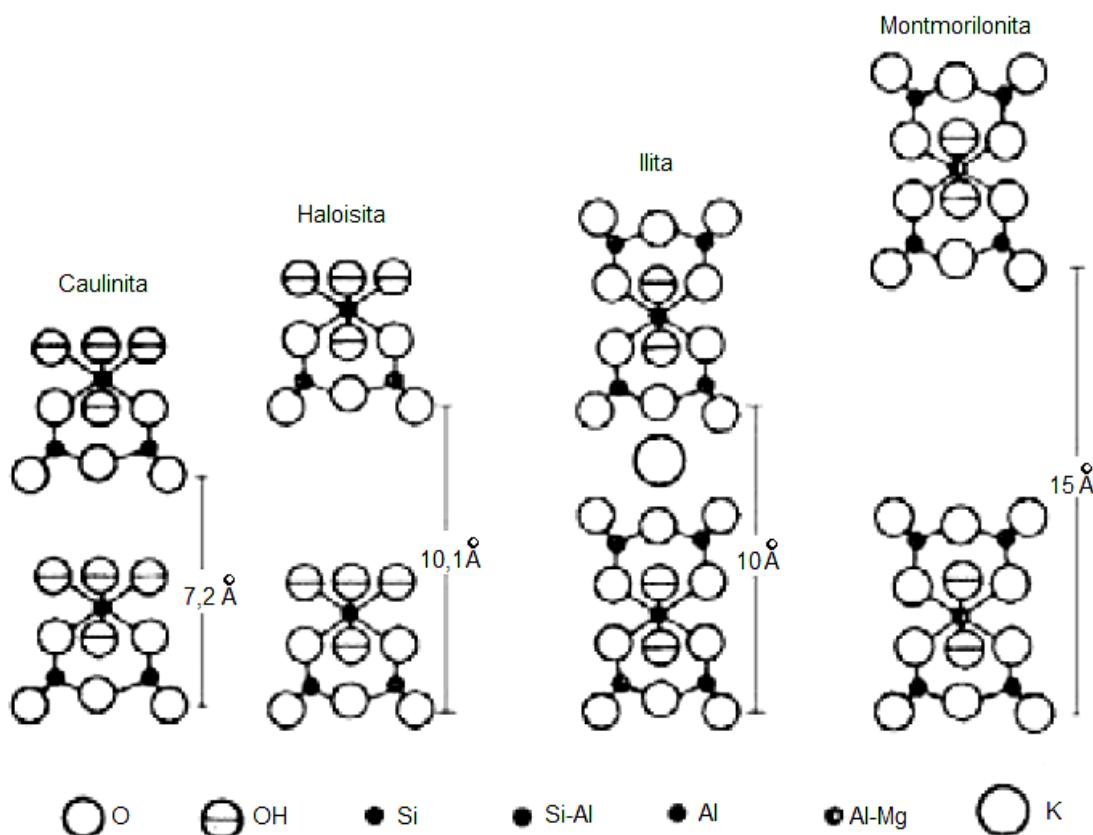


Figura 2.2. Estrutura dos principais argilominerais (DUTRA, 2007).

2.2.2. FRAÇÃO NÃO-ARGILOSA

A fração não-argilosa é representada pelos minerais acessórios, formada pela sílica, carbonatos, feldspatos, compostos de ferro e titânio, sais solúveis e matéria orgânica. Atua nas fases de conformação e secagem da peça, diminuindo a retração e favorecendo a secagem. Na fase do processamento térmico, esta fração desempenha o papel mais relevante, controlando as transformações, deformações e a sinterização.

Na maior parte das argilas, a sílica se apresenta na forma de quartzo (SiO_2). Ele cristaliza no sistema hexagonal e apresenta ponto de fusão da ordem de 1720°C. A

elevada porcentagem de quartzo na massa tende a diminuir sua plasticidade, e facilita o processo de secagem, pois este aumenta a permeabilidade da peça durante a etapa de conformação. Contudo sua principal influência na massa é a redução do coeficiente de dilatação da peça. Seu efeito na refratariedade da massa na etapa de queima é relativo, uma vez que tamanhos grandes diminuem a reatividade atuando como material inerte, enquanto que, tamanhos pequenos tendem a fundir e reagir com os outros constituintes da massa. Normalmente, elevadas quantidades de quartzo diminui a resistência mecânica do material (DUTRA, 2007). O quartzo alfa é estável à temperatura ambiente, transformando-se na fase beta a 573°C e em tridimita a 870°C, como mostra a Figura 2.3. À temperatura de 1410°C ocorre a transformação para cristobalita até atingir o ponto de fusão (DEER, 1975).

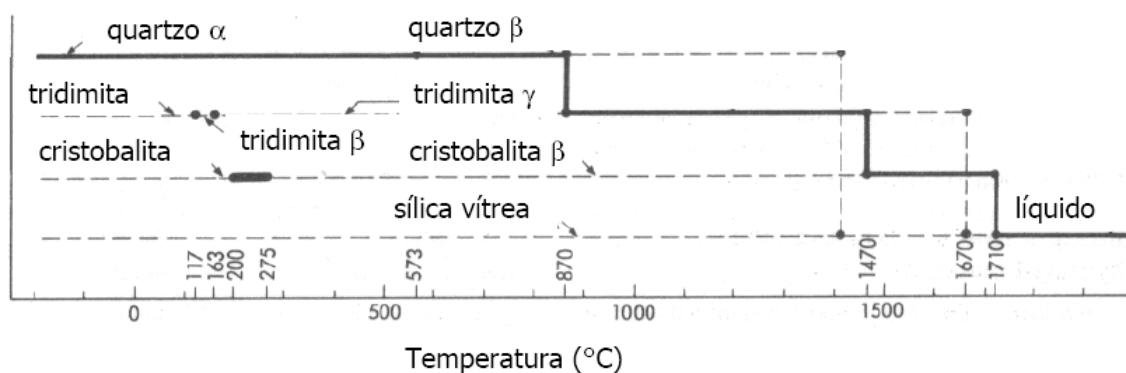


Figura 2.3. Diagrama das transformações alotrópicas do quartzo.

A calcita (CaCO_3), a magnesita (MgCO_3) e a dolomita ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$), são os carbonatos mais habituais encontrados nas argilas (BARBA, 1997). Os carbonatos de maneira geral regulam a porosidade da peça, proporcionando e viabilizando um intervalo mais amplo de queima. A redução do tamanho de partículas possibilita a diminuição da temperatura de decomposição dos carbonatos, aumentando a reatividade da massa. Atua ainda reduzindo a expansão por umidade dos materiais.

O termo feldspato cobre uma série de alumino-silicatos alcalinos ou alcalinos terrosos. Para a indústria cerâmica, os de maior importância são a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), a anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e ortoclasse (KAlSi_3O_8). Por terem temperatura de fusão relativamente baixa são empregados como geradores de “massa vítreia” nas massas cerâmicas e nos vidrados, reduzindo a temperatura de queima e a porosidade do produto. No entanto eles dificilmente são encontrados puros, em geral se apresentam em

mistura, principalmente com o quartzo, podendo também estar associados a outras impurezas.

A presença do óxido de ferro nas argilas naturais é na forma de impurezas, às vezes essa presença é desejável quando em pequenas quantidades (máximo de 10%). Os principais tipos são: hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$) e lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$), além de outras formas combinadas, como a magnetita ($\text{FeO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$) e a ilmenita ($\text{FeO}.\text{TiO}_2$) (LEITE, 2000). A cor vermelha do produto é devida principalmente da oxidação dos compostos de ferro. A intensidade da coloração vermelha depende da quantidade de óxido na matéria-prima e a uniformidade da sua distribuição granulométrica.

A matéria orgânica influí sobre diferentes características e propriedades das argilas, proporcionando a argila uma cor que varia de cinza ao preto em função do seu conteúdo. Estão presentes em quantidades apreciáveis nas camadas superficiais das jazidas. Sua presença provoca diminuição na porosidade do material e provocam freqüentemente rupturas durante a secagem. A presença de matéria orgânica no material também causa um defeito conhecido como coração negro, que ocorre quando a matéria-prima não oxida totalmente em consequência da combustão da matéria orgânica. A adição de aditivos (amônia, por exemplo) diminui o efeito, porém a melhor maneira de combate é o aumento do teor de substâncias não-plásticas (OLIVEIRA, 2003).

Devido ao papel principal na fase de queima os materiais não-plásticos são ainda qualificados de inertes, vitrificantes e fundentes, dependendo da temperatura de queima. Por exemplo, os álcalis de maneira geral, são materiais fundentes, no entanto se comportam como inerte a temperaturas de queimas inferior 1100°C. As matérias-primas fundentes têm como função aumentar a cinética da sinterização, por meio da formação da fase líquida viscosa, de modo a adequar as características finais do produto a um ciclo de queima industrial (VARELA, 2007). Essa fase líquida tende a preencher as cavidades do corpo cerâmico, dependendo da sua viscosidade, eliminando assim a porosidade.

2.3. PROCESSO PRODUTIVO

O processo de fabricação de produtos da cerâmica vermelha, independente do sistema utilizado, parte de uma mistura de matéria-prima, denominada comumente de

massa cerâmica, a qual sofre diversas transformações físico-químicas até alcançar as propriedades requeridas pelo produto acabado. Dentro do processo de fabricação destacam-se as etapas de preparação da massa, conformação por extrusão, secagem e queima. Problemas comuns como a ocorrência de trincas, deformações, variação no processo da extrusão, no corte, na regulagem de boquilha, na quantidade produzida, perda de secagem e queima, consumo elevado de combustível, entre outros, que afetam diretamente a qualidade do produto final, poderão ser evitados ou minimizados com a preparação adequada da massa juntamente com um controle eficaz do processo de produção. A falta de conhecimento técnico por parte dos ceramistas é o principal gargalo na busca pela qualidade do produto cerâmico.

2.3.1. PREPARAÇÃO DA MASSA

A preparação da massa é fundamental para a qualidade do produto a ser fabricado. A utilização da matéria-prima vinda diretamente da jazida e colocada no caixão dosador provoca diversos problemas de qualidade no produto e no processo de fabricação. É fundamental para uma boa preparação de massa, que a mistura tenha tempo para homogeneizar e descansar durante certo tempo de modo a diminuir as tensões sofridas após passar pelos equipamentos e possibilitar ao grão argiloso absorver a água adicionada no processo. Quanto melhor preparada for à massa maior será a produtividade e a qualidade do produto. Este procedimento irá contribuir para a redução do consumo energético e do desgaste dos equipamentos.

Blocos exigem matérias-primas com retração de secagem e de queima baixas além de uma excelente resistência mecânica à verde. Blocos estruturais precisam de resistência pós-queima bastante elevada. Blocos de vedação precisam ser leves, de baixa condutibilidade térmica e acústica. As telhas aceitam variações dimensionais maiores que os blocos e não precisam de tanta resistência pós-queima quanto os blocos estruturais. A matéria-prima deve ser mais plástica que uma massa para blocos. Em contrapartida, as telhas exigem uma longa procura de matérias-primas com uma particular beleza de cor, justificam a análise química dos óxidos de ferro e titânio na matéria-prima (LOLLI, 2000).

Existem inúmeros equipamentos destinados à preparação da massa, todos com a sua característica própria e eficiência. Estes equipamentos encontram-se instalados atrás da maromba que poderá ter a seguinte linha:

- Caixão Alimentador: possui uma esteira interna que conduz a argila para a saída onde uma comporta regulável dosa o seu escoamento. A constância na alimentação nunca é interrompida, e um eixo provido de hastes de corte duplo auxilia a passagem da argila, cortando os torrões de 20 a 30 cm.
- Desintegrador: compõe-se de dois cilindros. Os torrões saídos do caixão alimentador passam pelo desintegrador, que desmancha os torrões grandes. O cilindro maior, liso, gira em baixa velocidade e tem a função de manter uma alimentação constante de material, já o cilindro menor com facas, girando em alta velocidade, quebra os torrões mais duros de argilas secas, ou semi-secas, proporcionando um material uniforme e facilitando o trabalho das demais máquinas usadas na fase de preparação para extrusão. Apresenta bons resultados quando bem regulados os seus cilindros, sendo que os mesmos deverão ser fechados a 3 mm.
- Misturador: as facas intercaladas que giram em sentidos opostos cortam e desmancham os torrões já menores que 30 cm. Na saída do misturador, temos torrões de 2 a 3 cm e uma mistura de cor uniforme. Caso a cor não seja uniforme, o produto apresentará retracções e absorções diferentes ponto a ponto. A hidratação feita no misturador é rápida. Com um sistema desse tipo é indispensável o sazonamento prévio durante semanas, lote a lote o teor de água precisa ser controlado, levado até o valor desejado, aprovado e liberado.
- Laminadores: o objetivo dos laminadores é esmiuçar e desagregar os grãos maiores e os torrões. Cada laminador é composto de dois cilindros que se aproxima até uma distância precisa e controlada. Os grãos maiores, acima de 1 mm, contidos na argila causam desgastes dos cilindros. A maior alimentação no centro da esteira causa desgaste na metade do cilindro. Para reduzir essa tendência, usa-se uma faca niveladora na esteira e a matéria-prima será distribuída ao longo do cilindro. Os cilindros precisam ser retificados a cada semana. A distância entre os cilindros se mede com um paquímetro e deve ser feita semanalmente.

A Figura 2.4 a seguir representa esquematicamente a sala de máquinas de preparação e extrusão de uma indústria cerâmica, visando o acabamento final e a estrutura do produto, com produção horária em úmido de 28 a 35 toneladas/hora.

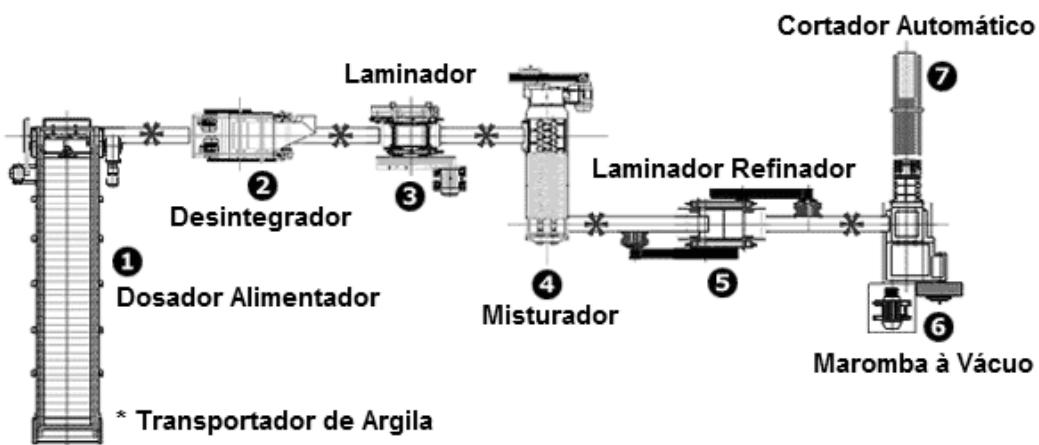


Figura 2.4. Sala de máquinas de preparação e extrusão com dupla laminação (BONFANTI, 2008).

A qualidade do produto está diretamente ligada ao processamento da composição da massa, quanto mais se prepara uma massa cerâmica, mais qualidade o produto terá e mais produtividade se alcançará.

A composição da massa deve manter uma porcentagem de resíduo constante, pois, a manutenção da mesma mantém a massa homogênea sem alterações no índice de plasticidade, estabilizando todo o processo, reduzindo problemas futuros.

2.3.2. EXTRUSÃO

A extrusão é o processo pelo qual se dá forma a um produto cerâmico através da compactação de uma massa plástica numa câmara de alta pressão equipada com sistema de desaeração (vácuo), contra um molde (boquilha), de formato desejado.

A primeira condição para se obter um bom resultado no processo é garantir que o material a se conformado apresente as mínimas variações possíveis, tanto na plasticidade, como na preparação granulometria e no seu teor de umidade.

São conhecidos três sistemas diferentes para extrusão: pistão, cilindros e hélices. O sistema com pistão tem como características a grande velocidade e pressão em toda a seção de saída, porém, seu fluxo não é contínuo impossibilitando a utilização do vácuo. O sistema com cilindros apesar de apresentar fluxo contínuo de alimentação e poder com isso utilizar-se do sistema de desaeração, o mesmo apresenta diferenças de velocidade e pressão na saída e ainda não permite uma boa homogeneização da mistura. O sistema com hélice permite boa homogeneização, utilização de sistema de vácuo,

fluxo contínuo e distribuição de pressão na saída do material. Este é o sistema mais utilizado nas extrusoras da indústria cerâmica vermelha. Devido ao seu funcionamento simples são as mais requisitadas para utilização no mercado, tem como fatores de importância à facilidade da união e saída da massa pelos bocais, que depende de fatores como a porcentagem de umidade (variando de 18 a 30%) e da quantidade das argilas empregadas, outro fator é a câmara de vácuo que provoca a expulsão da água, exposto a massa à ação do vapor de água (TUBINO, 2006). Segundo RIBEIRO, 2003, as forças de compressão no interior de uma extrusora apresentam dois picos em zonas diferentes (Figura 2.5). 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 a 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.

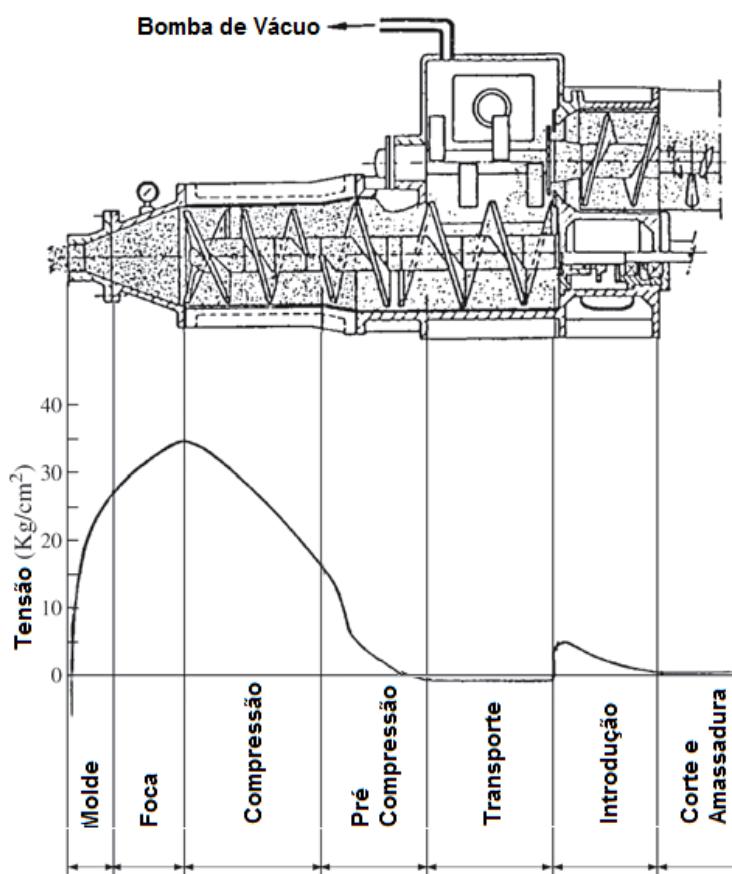


Figura 2.5. Corte de uma extrusora de dupla hélice, com o respectivo gráfico de pressões exercidas no seu interior e a identificação das diferentes zonas (RIBEIRO, 2003).

A maromba tem a função de homogeneizar, desagregar e compactar a massa cerâmica dando forma ao produto desejado. As massas plásticas são colocadas no bocal alimentador e imediatamente levadas através de dispositivos propulsores que, comprimem a massa à boquilha que, de maneira orientada dá formato ao produto verde.

A extrusora é um equipamento de alta tecnologia que geralmente possui os seguintes elementos:

- Alimentador-Misturador: sua parte inicial é parecida com um misturador de facas da preparação da massa. A massa passa do misturador a um primeiro caracol helicoidal que extruda sobre a grelha. Na grelha são retiradas as raízes e acontece a extrusão dos pequenos cilindros de massa. A finalidade da primeira extrusão é fragmentar a massa no interior da câmara de vácuo, a fim de facilitar a saída do ar.
- Bomba de vácuo: capaz de atingir de 85 % a 93 % da pressão atmosférica constitui ponto de destaque do processo da extrusão. As massas tratadas a vácuo proporcionam melhora na trabalhabilidade devido ao fator físico, bem como as reações físico-químicas existentes entre a água e a superfície do grão; por outro lado é a melhora obtida devido à elevação de tensão de vapor de água que, por seu estado gasoso, penetra mais rápido e mais profundamente no interior dos grãos da massa, aumentando sua resistência mecânica a cru em torno de 65 %, depois de cozidas a porosidade diminui em 40 % e sua resistência mecânica aumenta 12 %. A câmara de vácuo ainda exerce uma sucção e retira o ar entre os pequenos cilindros de massa e também o ar interno dentro de cada um deles, assim, a lata pressão de massa age em conjunto com a baixíssima pressão de ar, fazendo com que a massa forme um produto sem vestígios de solda plástica.
- Boquilha: é o elemento essencial para a formação da peça. Em princípio consiste em uma placa perfurada com pequena conicidade para saída de massa. Através da deformação plástica facilita sua passagem pela abertura, dando forma ao produto. Dentre os problemas surgidos durante esse processo, à maioria dos casos é devido à fabricação imperfeita das boquilhas e a variação de velocidade da massa que está dentro da extrusora, o ideal seria a saída da massa com velocidade igual em todas as cavidades do bocal. O cisalhamento produzido pelas paredes laterais é sempre maior que aquele produzido no centro, portanto, a massa sai mais rápido no centro que nas laterais. Para evitar defeitos de conformação de massa na saída da boquilha, tais como a formação de dentes, procura-se facilitar a saída de massa nos ângulos alargando os mesmos na

espessura do interior do bocal e utilizando como lubrificante a água se necessário; frear com chapa a saída da massa, nos locais onde sai mais rapidamente e melhorar a trabalhabilidade e sua resistência à tração.

- Cortadores: ao sair da boquilha, a massa se movimenta sobre o transportador de rolo. Os fios cortadores são esticados em quadro móvel, espaçados de acordo com a medida requerida.

Depois de cortadas as peças apresentam-se perfeitas aparentemente, posteriormente quando submetidas ao processo de secagem apresentam-se com fendas e empenamento. Estes defeitos são produzidos pelo mau equilíbrio da boquilha. Para regular o equilíbrio, comumente são colocados freios metálicos no início da boquilha. De um modo geral, pode-se afirmar que argilas com elevada plasticidade, deslizam melhor sobre a superfície da hélice, traduzindo-se numa maior pressão e, consequentemente, numa melhor homogeneização e compactação da massa argilosa na zona de saída. Por outro lado, argilas de baixa plasticidade, devem ser utilizadas no fabrico de peças com grande seção de saída, o que pressupõe menor tratamento no molde e menor pressão de extrusão. Essa explanação é traduzida na Figura 2.6.

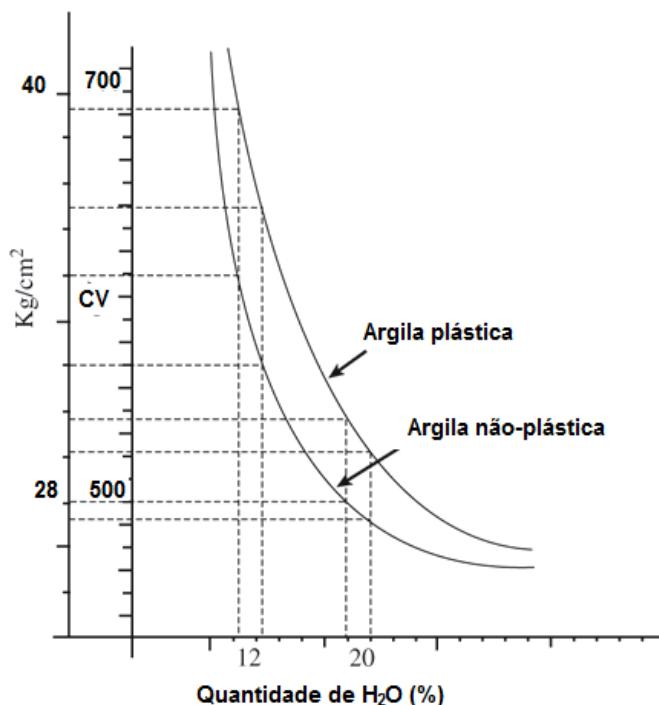


Figura 2.6. Variação da pressão de extrusão e da potência exercida pelo motor em função do teor de umidade, para uma massa mais plástica e para outra menos plástica (RIBEIRO, 2003).

A alvenaria cerâmica de qualidade tem como objetivo produtos de boa qualidade, que permitem alta produtividade de construção, em formatos padronizados, com dimensões precisas que permitam execução rápida. Isso se consegue com controle de qualidade rigoroso.

2.3.3. SECAGEM

Consiste na eliminação, por evaporação, da água de formação das peças. As peças cerâmicas são consideradas tecnicamente secas, se ainda resta até 2 % de umidade residual. Esse processo é influenciado por diversos fatores como: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e aplicação da direção do ar, a densidade de carga, composição granulométrica da massa, forma, dimensão e método de conformação das peças.

A secagem das peças cerâmicas pode-se realizar ao natural ou em secadores controlados. Na secagem natural as peças são colocadas em locais abertos, expostas à ventilação e ao calor. Este tipo de secagem é demorado, necessita de muito espaço coberto para armazenamento e acarreta manipulação excessiva do material.

Os secadores controlados podem ser classificados em duas categorias: secadores intermitentes e contínuos. O secador de câmara, alimentado com ar quente fornecido por uma fonte de calor é o tipo de secador intermitente mais comum. O secador tipo túnel, utilizado numa vasta gama de materiais cerâmicos, é o mais comum na classe dos contínuos. Para que as condições de secagem ao longo do túnel permaneçam constantes e correspondam a valores ótimos de temperatura e umidade, é indispensável à permanente introdução de ar quente na mistura ar/vapor de uma zona para outra.

A disposição das peças para secagem obedece a critérios específicos, de forma que a condição ideal seria aquela em que o centro da peça estivesse com temperatura superior a da superfície, dessa maneira, a tensão de vapor forçaria a difusão da umidade até a superfície.

A velocidade de saída de água, no início da secagem é rápida e a peça tem grande contração. À medida que os grãos se encostam uns nos outros, a contração diminui até chegar ao ponto crítico, agora, a massa já não contrai mais e a velocidade de secagem passa a decrescer. Esse é o ponto da saída de água dos poros.

A Figura 2.7 mostra uma típica curva de Bigot (OLLER, 1981) que descreve a evolução da retração de secagem em função da perda de água de conformação. O ponto (A) representa na ordenada (ponto E), a quantidade de água de umidade que as peças apresenta no início da etapa de secagem. Na abscissa, pode-se obter a retração total de secagem que irá ocorrer. A linha (A-B) representa a primeira fase de secagem com eliminação de água de plasticidade, localizada entre as partículas. Esta é a fase mais problemática na etapa de secagem já que a eliminação de água entre partículas é acompanhada de retração. Conforme já mencionado anteriormente, com a retração de secagem aumenta-se o risco de aparecimento de defeitos. A linha (B-C) representa a segunda fase de secagem caracterizada pela eliminação de água intersticial. Teoricamente, o ponto (B) deveria situar-se no eixo da abscissa, indicando ausência de retração de secagem quando se iniciar a eliminação de água intersticial.

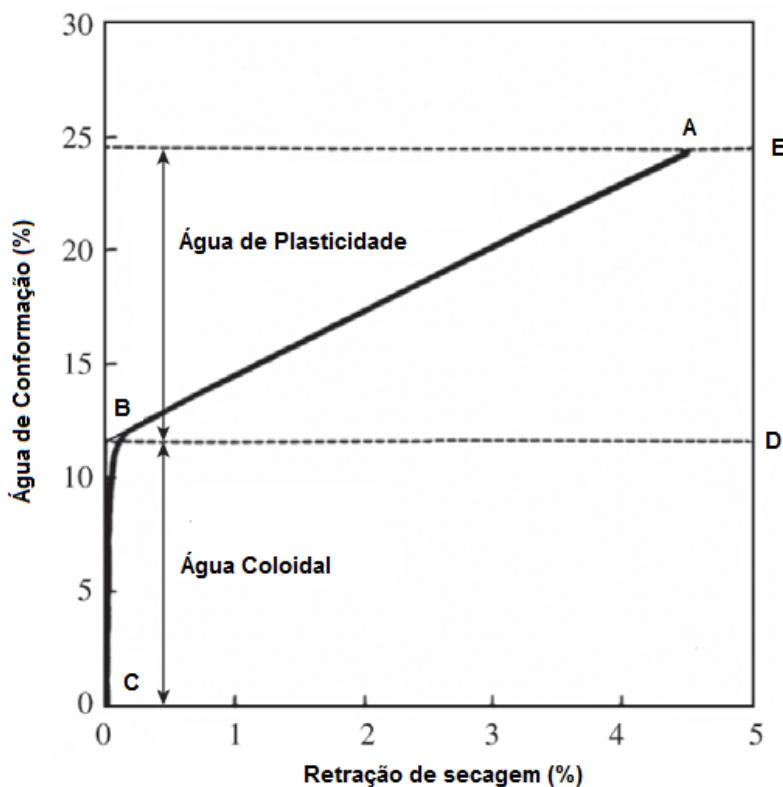


Figura 2.7. Variação da retração de secagem em função da água de conformação, curva de Bigot (VIEIRA, 2003).

Entretanto, na prática, nem todas as partículas entram em contato ao mesmo tempo, já que a superfície seca com mais rapidez que o interior da peça. Com isso, parte da água evaporada ainda se origina da interposição entre partículas. Por outro lado, à

medida que evapora esta água de plasticidade a água intersticial proveniente dos capilares e que não produzem retração, vai tornando-se predominante (BARBA, 1997). O ponto (D) separa os dois tipos de água de umidade. A água de plasticidade corresponde ao valor (D-E), enquanto que a água intersticial é representada pelo segmento (D-C). A Figura 2.8 descreve esquematicamente a evolução da eliminação de água de conformação e retração de secagem de uma massa cerâmica plástica. Em I está representado o sistema argila-água no início da etapa de secagem. Em II, após certo período de tempo, já não há mais a água de plasticidade que separa as partículas. Por outro lado, ainda há água nos capilares, denominada de água intersticial. Observa-se também que houve retração em relação ao estágio inicial. Já em III toda a água intersticial já foi eliminada e a peça não apresenta retração em relação ao estágio II.

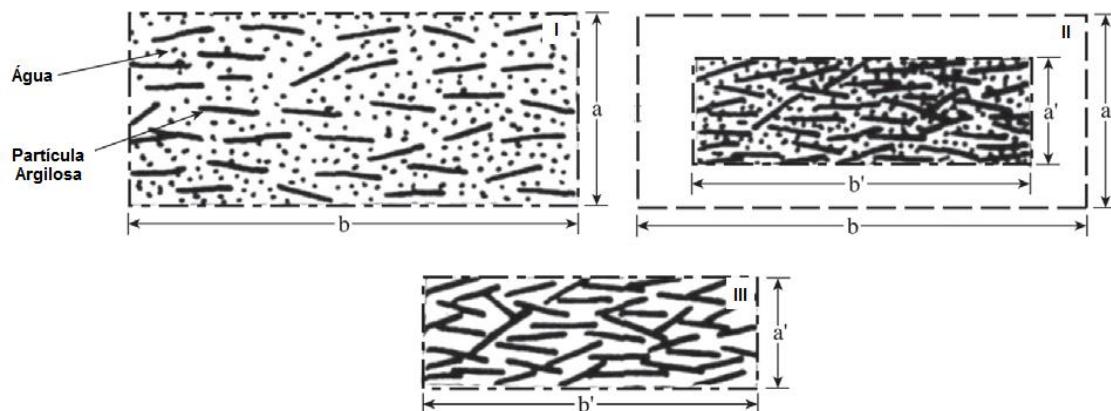


Figura 2.8. Representação esquemática da secagem do sistema argila-água.

Argilas muito plásticas e de granulometria muito fina necessitam de grande quantidade de água de amassamento e, portanto, experimenta uma elevada contração de secagem. A velocidade de secagem torna-se lenta, o que dificulta a migração de água até a superfície. Para facilitar a secagem das massas argilosas muito finas, é preciso colocar um material de granulação mais grossa (VIEIRA, 2003).

Os defeitos produzidos na secagem são causados pela contração da massa. Uma contração diferenciada produz tensões internas, que se manifestarão na forma de trincas visíveis, durante a secagem ou invisíveis, que se propagam durante a queima. O empenamento é causado por tensões produzidas durante a formação das peças e, também, por diferença de secagem. Se uma parte da peça seca antes que a outra se torna rígida pela contração diferenciada, que puxa a parte plástica, deformando-a. As trincas

são pequenas fissuras causadas pela secagem rápida, geralmente se iniciam nas bordas e propagam-se até o centro da peça e apresentam uma textura áspera e o formato de um afluente, sendo mais aberta na borda que no centro.

2.3.4. QUEIMA

Uma das etapas mais delicadas do processo cerâmico é a queima. Eventuais defeitos originados nas etapas anteriores revelam-se somente quando o material é queimado. Consiste em submeter às peças conformadas e secas a uma dada temperatura para que elas adquiram as propriedades desejadas, dentro de valores específicos. Na cerâmica vermelha os produtos são queimados em fornos a uma temperatura entre 850 °C e 1050 °C.

A cerâmica vermelha possui na sua composição, principalmente, SiO_2 e Al_2O_3 . O K_2O quando presente forma eutético com SiO_2 e Al_2O_3 a temperaturas mais baixas que os demais óxidos fundentes e por essa razão, um diagrama bastante utilizado no estudo das possíveis fases formadas é o diagrama ternário $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$, apresentado na Figura 2.9 (ALPER, 1995).

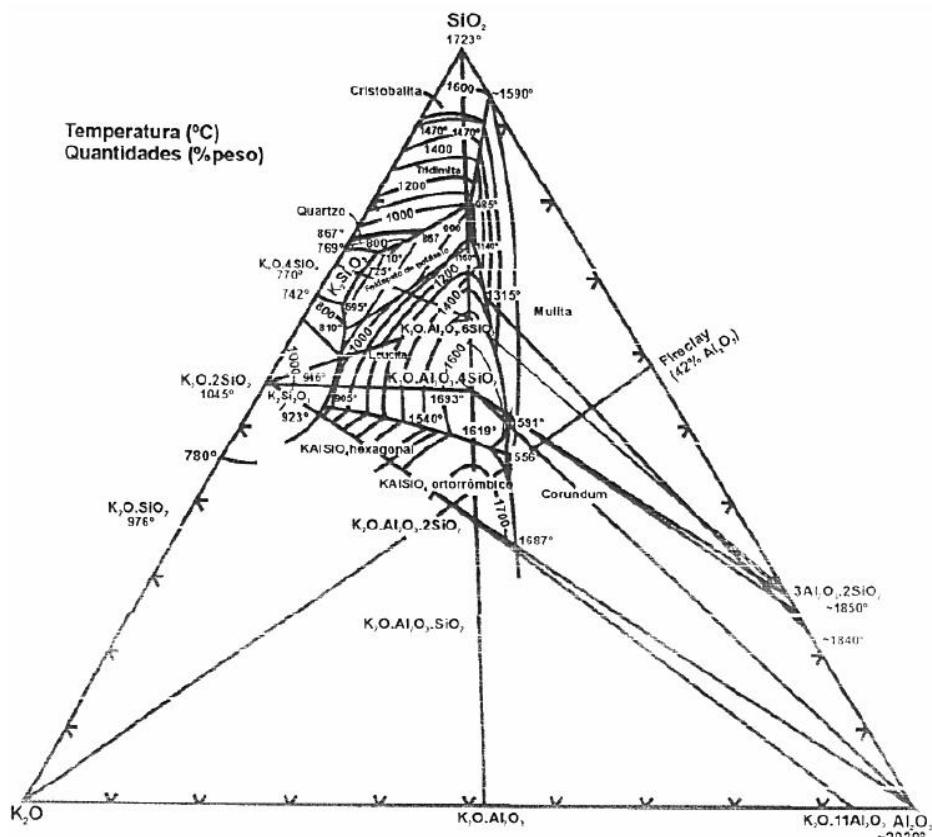


Figura 2.9. Diagrama de equilíbrio Al₂O₃.SiO₂.K₂O (ALPER, 1995).

Pode ser observado neste diagrama que a sílica funde a 1723°C e a alumina 2020°C. A temperatura do eutético do sistema ternário é 990°C e o início da formação dos cristais de feldspato potássico ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) a partir da fase líquida é 1140°C. Para uma composição definida de sílica e alumina, aumentando-se o teor de óxido de potássio, observa-se um aumento significativo da quantidade de fase líquida formada e uma diminuição da temperatura de fusão das cerâmicas (ALPER, 1995).

A peça crua quando colocada em forno sofre os defeitos do aquecimento, durante o qual ocorrem alguns fenômenos que exigem cuidados:

- Pouco acima de 100 °C inicia-se a eliminação da água higroscópica remanescente, a água que permaneceu se a secagem não foi absoluta ou se o corpo absorveu umidade do ambiente externo durante o tempo de saída do secador e entrada no forno;
- A cerca de 200 °C ocorre a eliminação da água coloidal, a água fica ligada a partícula argilosa e que permanece mesmo após a secagem;
- De 350 °C a 650 °C ocorre a queima de substâncias orgânicas presentes na massa, como também a dissociação de compostos sulfurosos e ainda a liberação, na forma de vapor, da água de constituição das argilas (água quimicamente combinada na caulinita);
- Em temperaturas próximas a 570 °C dá-se a transformação do quartzo, acompanhada de expansão;
- Entre 870 °C e 900 °C os carbonatos decompõem-se e liberam CO₂, acima de 700 °C desenvolvem-se reações químicas da sílica e da alumina com os elementos fundentes, havendo formação de complexos sílico-aluminosos, que são exatamente os que trazem a dureza, resistência e estabilidade ao corpo cerâmico;
- Acima de 1000 °C os compostos sílico-aluminosos, que estão na forma vítreia, começam a amolecer e o corpo cerâmico pode escoar, deformando-se.

Além da temperatura, o tempo de queima é fundamental para que as reações aconteçam e se tenha um bom produto. Durante a queima é importante controlar a velocidade com que a temperatura aumenta ou diminui ao longo do tempo, deve-se ter esse cuidado devido à expansão e contração que as peças sofrem durante o aquecimento

ou resfriamento. Não existem tempos nem curvas-padrão de temperatura, já que esses parâmetros variam com o tipo de forno, argila e com a eficiência de queima.

O alinhamento dos queimadores dos fornos e a sua regulagem são outros fatores fundamentais para uma boa homogeneização do calor no interior da câmara. Calor mal distribuído pode resultar em peças, na mesma *fornada*, cruas, sobrequeimadas ou boas, dependendo do posicionamento no forno.

A queima do material é feita em fornos que podem ser de dois tipos básicos: os intermitentes ou periódicos e os contínuos. Nos fornos intermitentes o processo de queima consiste em carga manual, aquecimento até uma determinada temperatura, patamar na temperatura máxima desejada e resfriamento. Esses se caracterizam por baixas produções, elevado consumo de combustível e de mão de obra. São fornos onde a distribuição de temperatura não é uniforme em toda sua câmara, de modo que se observam diferentes graus de queima do material, em função da localização da peça durante o processo de queima. Normalmente são circulares ou retangulares, com teto em forma de abóbada, construídos com tijolos de alvenaria comuns.

Os fornos túneis de chama livre são constituídos por uma longa galeria retilínea, com altura relativamente pequena, comparada com o comprimento, que pode chegar a 140 metros. Nestes fornos, o material se movimenta, enquanto o fogo fica parado. O material a queimar é colocado sobre vagonetas, que percorrem lentamente a galeria, de uma extremidade a outra, sobre trilhos, empurradas com velocidade contínua, por um pistão hidráulico, colocado na extremidade de entrada. Em intervalos regulares, uma vagoneta é introduzida na galeria e, na extremidade oposta outra é retirada. A finalidade desse tipo de forno é aquecer todas as superfícies da peça de forma gradual e uniforme, para que ocorram as transformações físico-químicas supracitadas anteriormente, assim distinguem-se no túnel quatro zonas distintas: pré-aquecimento, queima, resfriamento rápido e lento.

Nos fornos contínuos tipo Hofmann, o material é fixo e o fogo é móvel. Este é constituído por duas galerias paralelas, unidas nas extremidades por uma passagem de fogo, tendo nas laterais portas, por onde se faz a enforra e desenforra dos produtos. O fogo é alimentado pelas boquetas, em número de três ou quatro, segundo a largura da galeria e situada na parte superior do forno. Este tipo de forno tem vantagens, pois ao mesmo tempo em que ocorre a queima, verifica-se a enforra e desenforra e também

porque os gases da combustão realizam o pré-aquecimento do material a queimar. Outra vantagem é a recuperação do calor das câmaras que estão em resfriamento para a zona de queima ou ainda, direto para secagem dos produtos nos secadores.

Segundo LOPES, 2006, no estado do RN, a quase totalidade das cerâmicas utiliza fornos à lenha para a queima dos produtos, gerando uma perda significativa na produção em função da falta de controle de temperatura no forno. Uma alternativa à substituição da lenha como combustível nas cerâmicas potiguanas é o gás natural, que surge como uma forma de incrementar uma nova base tecnológica de produção, pesquisa e industrialização do setor cerâmico no Estado. Comprovou-se que os blocos sinterizados com gás natural apresentam propriedades desejáveis superiores aos comparados com os sinterizados com lenha, como mostra a Figura 2.10, ou seja, menor porosidade, absorção de água e maior resistência mecânica.

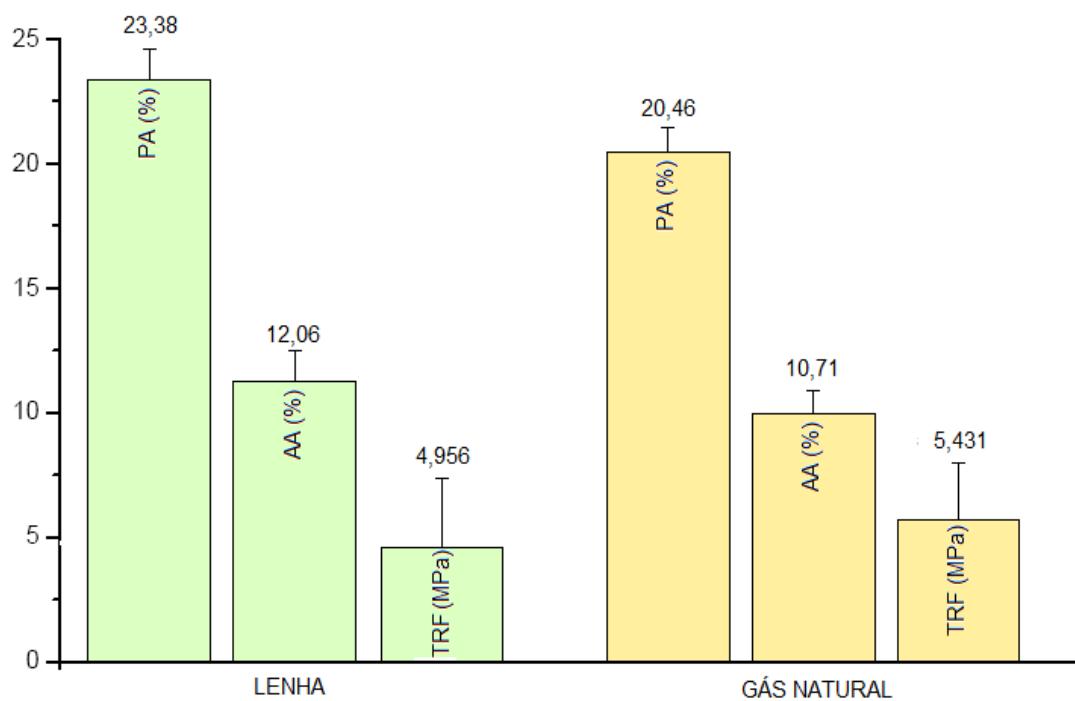


Figura 2.10. Representação comparativa das propriedades tecnológicas das amostras submetidas a queima com lenha e gás natural (LOPES, 2006).

Em contrapartida, se o desejado for um bloco de menos massa específica, o bloco queimado com lenha apresenta-se mais vantajoso por ter menor massa específica (Figura 2.11).

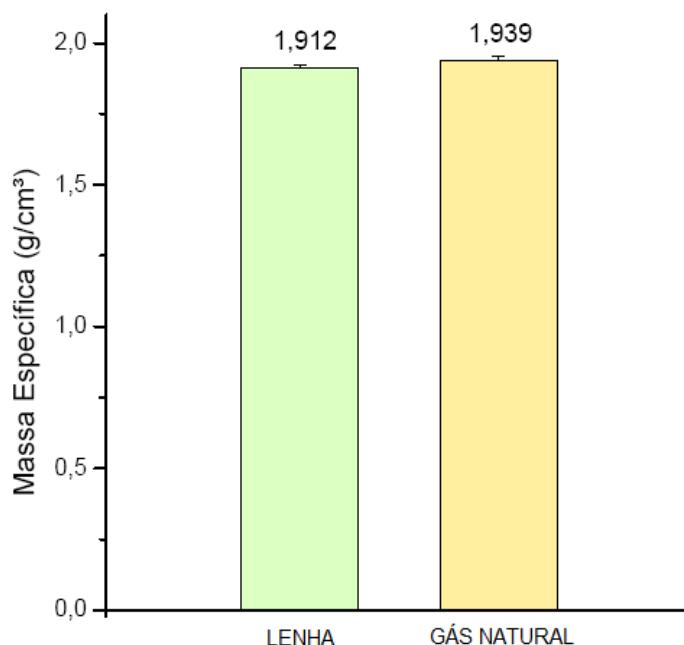


Figura 2.11. Massa específica aparente das amostras (LOPES, 2006).

2.4. TELHAS CERÂMICAS

As telhas cerâmicas são utilizadas como componentes de coberturas de edificações. A massa argilosa é conformada normalmente por extrusão com umidade variando entre 20 e 25%, na forma de bastões seccionados e depois prensados para obtenção da forma final.

A produção de telhas depende muito das características de suas matérias-primas, constituída basicamente por argilas plásticas e não-plásticas. Os materiais não-plásticos atuam como agentes desplastificantes nas composições quando misturados com os materiais argilosos, que por sua vez apresentam granulometria muito fina, e uma distribuição granulométrica adequada é fundamental ao processamento e às características de qualidade do produto desejado.

Segundo PRACIDELLI, 1997, o diagrama de Winkler orienta-nos no estudo da composição granulométrica das massas cerâmicas. Uma massa cerâmica não pode ser constituída somente de argilas plásticas, pois apresenta grandes dificuldades no processamento, desde a conformação das peças, incluindo ainda a secagem e queima. A solução é fazer uma composição granulométrica adequada, dosando-se grãos finos, médios e grossos, e para este caso, o diagrama é a ferramenta ideal para se fazer este estudo. A Figura 2.12 mostra o diagrama onde se situam os tipos de produtos da

cerâmica vermelha. Na Tabela 2.2 são apresentadas as composições granulométricas dos produtos, de acordo com o diagrama de Winkler expresso.

Tabela 2.2: Composição granulométrica dos produtos da cerâmica Vermelha.

Tipos de produtos	Composição granulométrica (%)		
	< 2 μm	2 a 20 μm	>20 μm
A. Materiais de qualidade com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B. Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C. Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D. Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	20 a 55

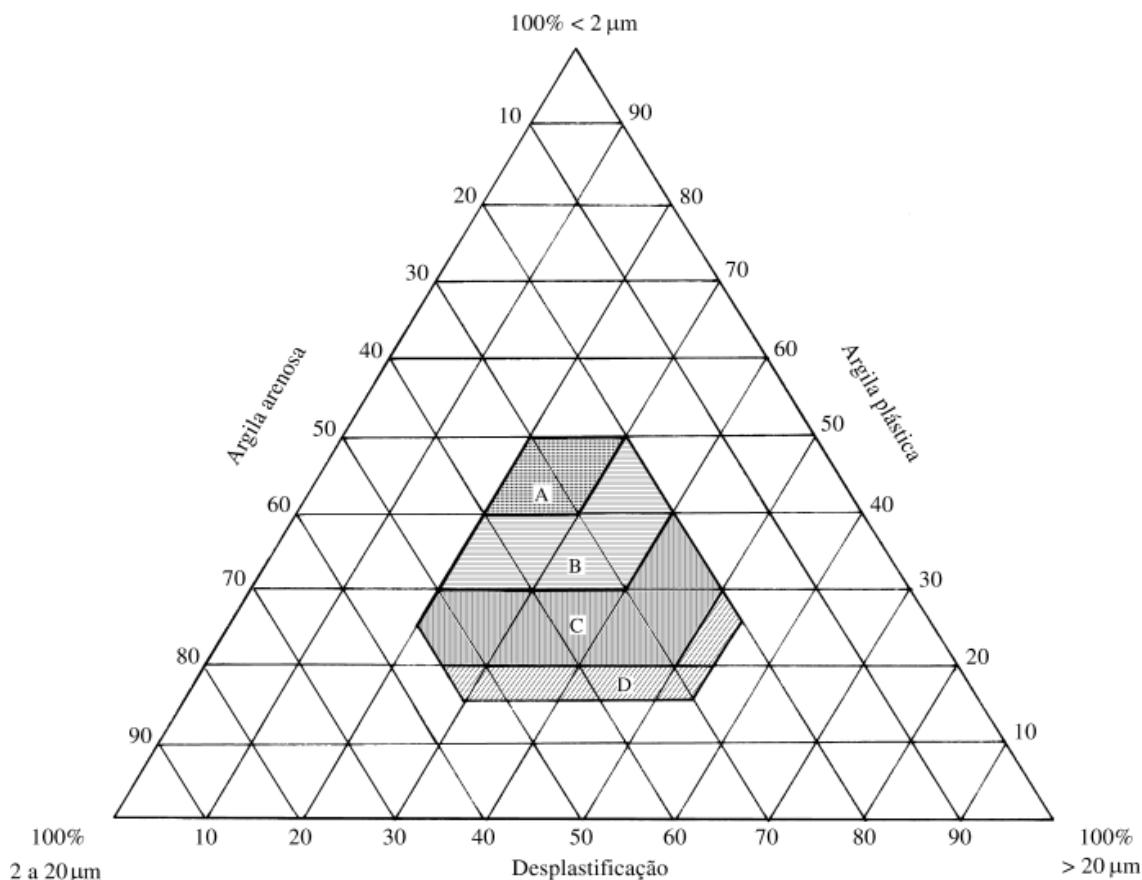


Figura 2.12. Aptidão das massas de cerâmica vermelha segundo a composição granulométrica, conforme diagrama de Winkler (PRACIDELLI, 1997).

Superfícies lisas para facilitar o escoamento das águas, inexistência de fissuras, microfissuras, esfoliações, quebras, rebarbas ou qualquer defeito que prejudique o perfeito encaixe entre os componentes são algumas das muitas especificações que o produto tem que obedecer. Telhas cerâmicas em conformidade apresentam parâmetros máximos e mínimos para dimensões, formas, resistência, impermeabilidade, absorção de água etc, dada por um conjunto de normas que se complementam entre si designadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Outra importante propriedade, característica do produto é a uniformidade da cor. A cor vermelha é resultante principalmente da oxidação dos compostos de ferro e sua intensidade depende da quantidade do mesmo na massa, enquanto que a uniformidade varia com a distribuição granulométrica. Cores intensas de vermelho manifestam-se com teores de 4% de Fe_2O_3 (OLIVEIRA, 2000).

A telha tipo capa e canal é um dos tipos mais difundidos entre as empresas produtoras, constituída por peças côncavas (canais) e convexas (capas) que se recobrem longitudinal e transversalmente. As principais subclassificações desse tipo são as telhas coloniais, plan e paulista. A Figura 2.13 a seguir, mostra além da telha capa canal outros tipos, dentre as quais se destaca a telha portuguesa e romana com seus respectivos rendimentos.

	Telha Plan: Rendimento: 28 unid/m ² Dimensões: 44 x 18 cm Peso: 1,550 kg/unid	   
	Telha Romana: Rendimento: 18 unid/m ² Dimensões: 39 x 22 cm Peso: 2,260 kg/unid	
	Telha Portuguesa: Rendimento: 18 unid/m ² Dimensões: 39 x 21 cm Peso: 2,260 kg/unid	
	Telha Colonial: Rendimento: 28 unid/m ² Dimensões: 46 x 18 cm Peso: 1,750 kg/unid	

Figura 2.13. Principais tipos de telhas com suas características principais.

As telhas cerâmicas devem apresentar cozimento uniforme, ter superfícies lisas e proporcionar o perfeito encaixe entre os componentes. A qualidade desses produtos é atestada pela verificação destas e outras características geométricas e físicas previstas em normas específicas (MACEDO, 2007).

2.5. PÓLO CERÂMICO DO SERIDÓ

A região Seridó (Figura 2.14) está localizada na porção centro-meridional do Rio Grande do Norte e encontra-se subdividida em 23 municípios (Acari, Caicó, Carnaúba dos Dantas, Cerro Corá, Cruzeta, Currais Novos, Equador, Florânia, Ipueira, Jardim de Piranhas, Jardim do Seridó, Jucurutu, Lagoa Nova, Ouro Branco, Parelhas, Santana do Seridó, São Fernando, São João do Sabugi, São José do Seridó, São Vicente, Serra Negra do Norte, Tenente Laurentino Cruz e Timbaúba dos Batistas). O clima que predomina na região é significativamente quente e semi-árido, com estações do ano não muito bem definidos e índices pluviométricos irregulares e baixos, variando entre 300 a 800 mm/ano, distribuídos de janeiro a julho. O solo seridoense é formado e protegido pela vegetação da Caatinga (MORAIS, 2005).

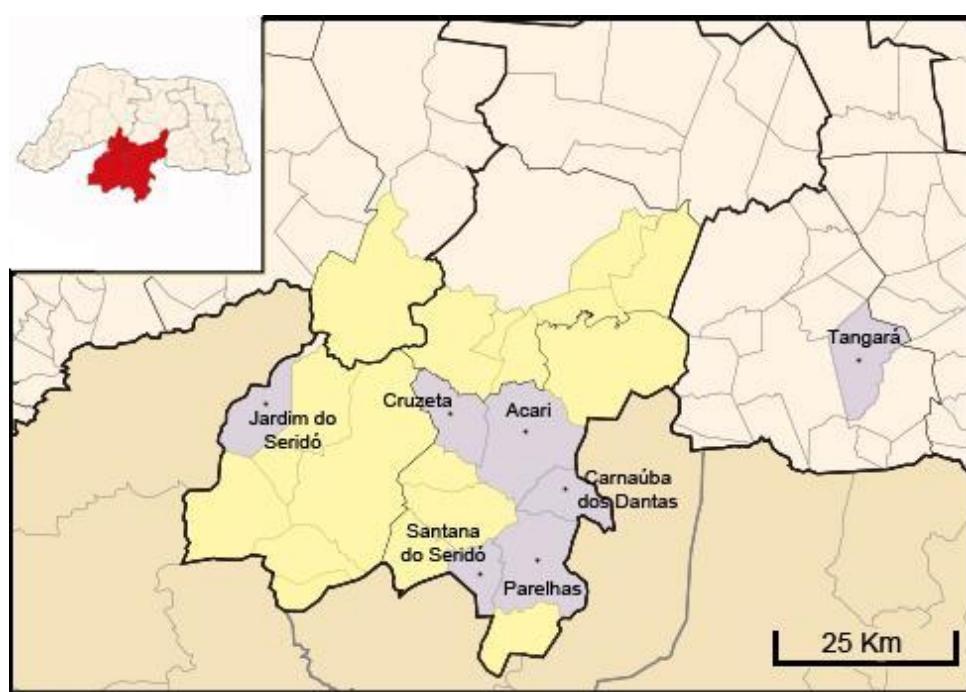


Figura 2.14. Seridó norte-rio-grandense, Região em Estudo.

Estudos sobre a região do Seridó norte-rio-grandense levam em consideração a existência e a localização de jazidas de matérias-primas do reino mineral, metálicas e não-metálicas, possíveis de serem extraídos pelo homem mediante comodidade e

possibilidades industriais. Nesta disposição de forma que cartografam as certanias seridoenses, o material rochoso constitui-se por: Rochas metamórficas (gneiss, xisto, quartizitos, calcário cristalino e migmatitos metamórficos, etc); Rochas ígneas (granito, pegmatitos, etc); e Rochas sedimentares (solos aluviais dos rios e/ou planícies de inundações que ocorrem em menos quantidade) (PROJETO ESTUDOS REGIONAIS DO RN, 2008). Na Figura 2.15 abaixo mostra o mapa geológico da região.

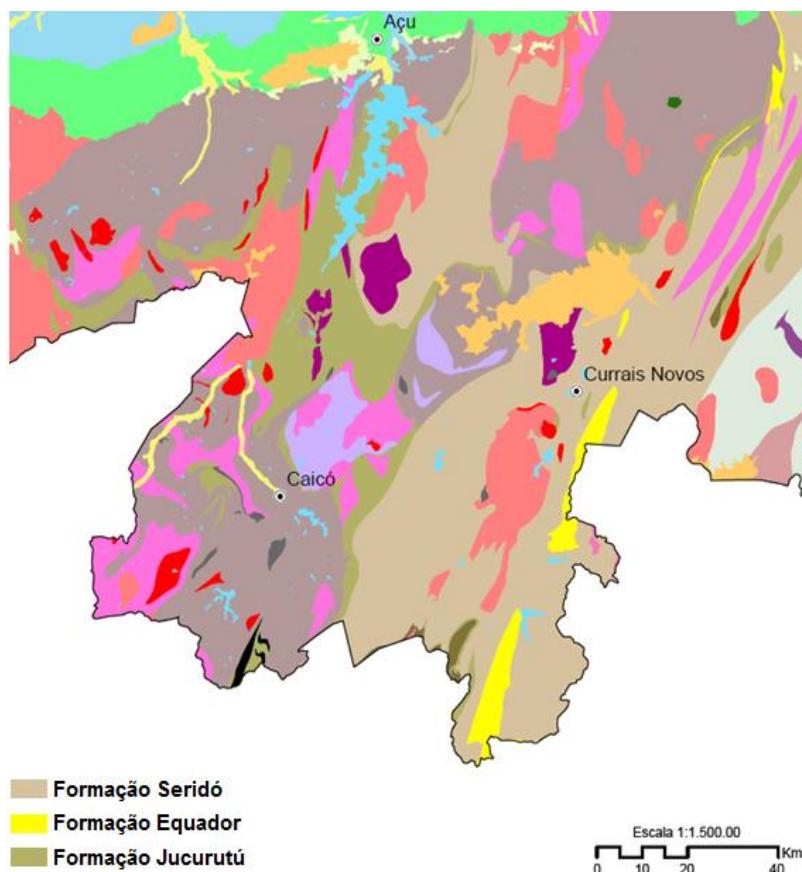


Figura 2.15. Mapa geomorfológico da região do Seridó-RN.

A região do Seridó pode ser dividida em três regiões geomorfológicas:

- Formação Seridó: formados por micaxistas aluminosos e feldspáticos, com ocorrência e percentagem variável de granada, cordierita, estaurolita, sillimanita, andaluzita e, raramente, cianita. Exibem migmatização em alguns setores, intercalações restritas de mármores, calciosilicáticas, quartzitos, metaconglomerados polimictos e ortoanfibolitos (metavulcânicas básicas de afinidade toleítica).
- Formação Equador: consiste basicamente de quartzitos puros, muscovíticos ou feldspáticos, com turmalina sillimanita, e níveis ferruginosos ou ricos em epídoto

granada, subordinados. Intercalações de metaconclomerados mono ou polimictos, além de micaxistas e calciosilicáticas.

- Formação Jucurutu: contém paragnaisse com biotita epídoto diopsídio anfibólito. Freqüentes intercalações de mármore, calciosilicáticas e paranfibolitos. Também ocorrem níveis de quartzitos e metaconglomerados (na/ou próximos à base), ortoanfibolitos (metavulcânicas básicas e intermediárias, de afinidade transicional a toleítica), serpentinitos, formações ferríferas e micaxistas aluminosos. Feições de migmatização podem estar presentes.

O projeto APL de Telha Cerâmica do Seridó tem como objetivo fortalecer a competitividade da indústria de telha da região, por meio da melhoria da gestão empresarial, a partir da elevação dos índices de produtividade e qualidade; da redução dos custos e desperdícios; melhoria da qualidade técnica dos colaboradores e da ampliação da participação e do posicionamento no mercado. Com geração de 650 empregos diretos e atuação nos municípios de Acari, Carnaúba dos Dantas, Cruzeta, Parelhas, Jardim de Piranhas, Santana do Seridó e Tangará (IEL, 2008). As 23 indústrias cerâmicas contribuem com uma produção de aproximadamente 18 milhões de peças/mês, com destaque para fabricação de telhas do tipo colonial, como representado pela Figura 2.16.

Percentual da Produção Cerâmica

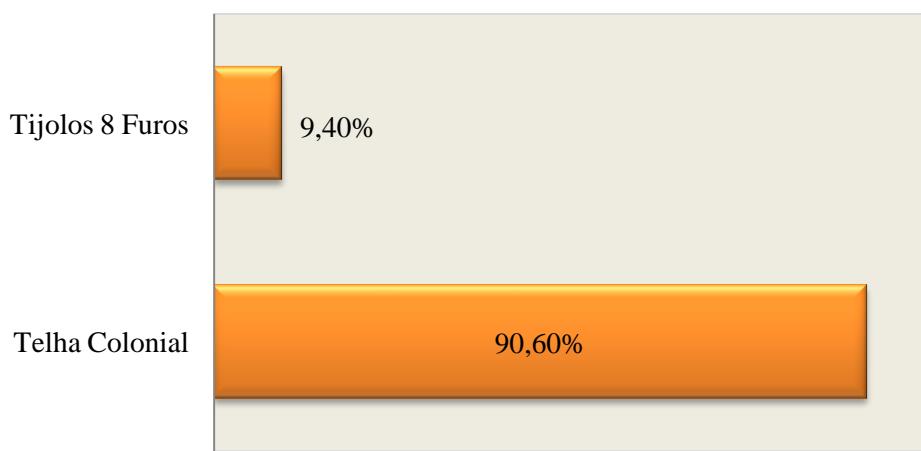


Figura 2.16. Percentual de produtos fabricados pelas indústrias.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Dividido em três partes, o presente capítulo apresenta os materiais selecionados para a realização deste estudo e toda a metodologia experimental utilizada para tornar efetivos os objetivos propostos. Esta primeira parte foi denominada ensaios preliminares, onde esta apresentada às matérias-primas utilizadas, a nomenclatura e todas as técnicas de caracterização utilizadas para a identificação destes materiais. Na segunda parte, é descrita os métodos tomados para a formulação das massas cerâmicas escolhidas a partir do levantamento realizado junto às indústrias cerâmicas da região do Seridó. E a terceira e última parte refere-se ao procedimento adotado na elaboração das curvas de queima, análise das propriedades físico-mecânicas e estudo da microestrutura do produto final.

3.1. ENSAIOS PRELIMINARES

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram selecionadas procurando-se obter uma amostra que representasse uma situação geral com relação às matérias-primas argilosas utilizadas pelas indústrias da região.

A Tabela 3.1, apresenta a nomenclatura das matérias-primas utilizadas, conforme seqüência de coleta durante as visitas nas indústrias. Previamente, podem-se denominar as argilas utilizadas como “*argilas de várzea*”, isto devido ao local de extração das mesmas.

Tabela 3.1: Amostra adotada para o trabalho e localização na Região do Seridó.

Nomenclatura	Localização	Jazida
A1	Acari	Bulhões
A2	Cruzeta	Cauaçu
A3	Carnaúba dos Dantas	Massapê
A4	Currais Novos	Totoró
A5	Parelhas	Taperoá – PB
A6	Tangará	Manissoba
A7	Santa Cruz	Trairi

O principal critério de seleção das matérias-primas foi à busca de uma distribuição representativa dos materiais argilosos da região, levando-se em conta o maior número de empresas que as utilizam nas formulações e na localização das jazidas de extração.

3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A Figura 3.1 abaixo representa como foram realizados os ensaios preliminares de caracterização em todas as matérias-primas coletadas. Todas as amostras coletadas passaram pelo processo de amostragem por quarteamento, para obtenção de uma amostragem representativa (DUTRA, 2007).

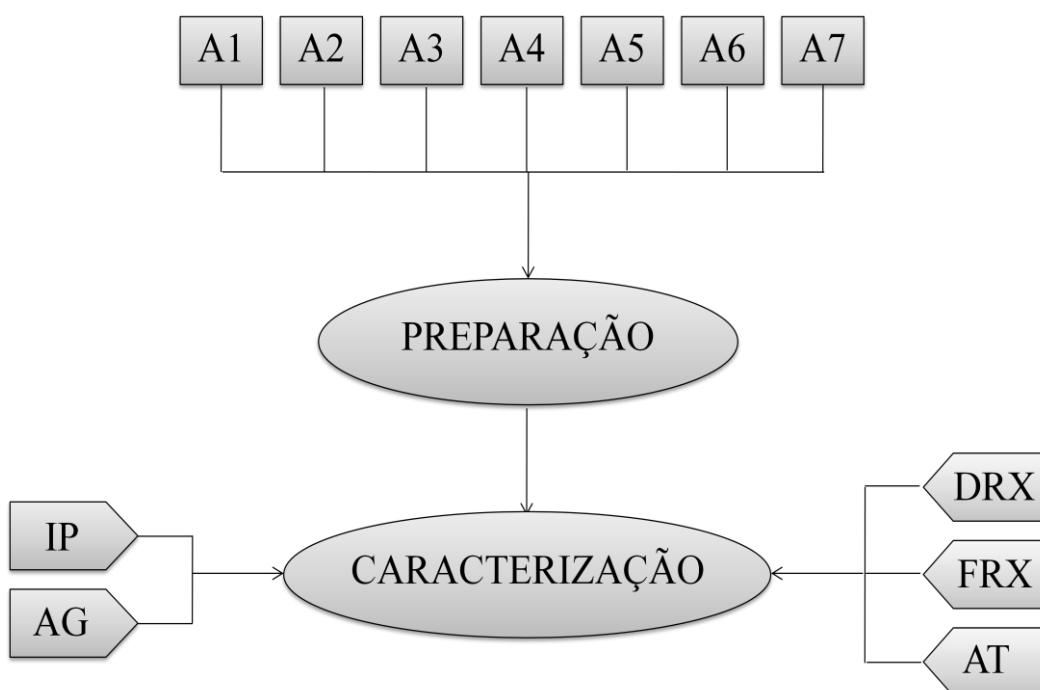


Figura 3.1: Representação esquemática do procedimento experimental da caracterização das matérias-primas.

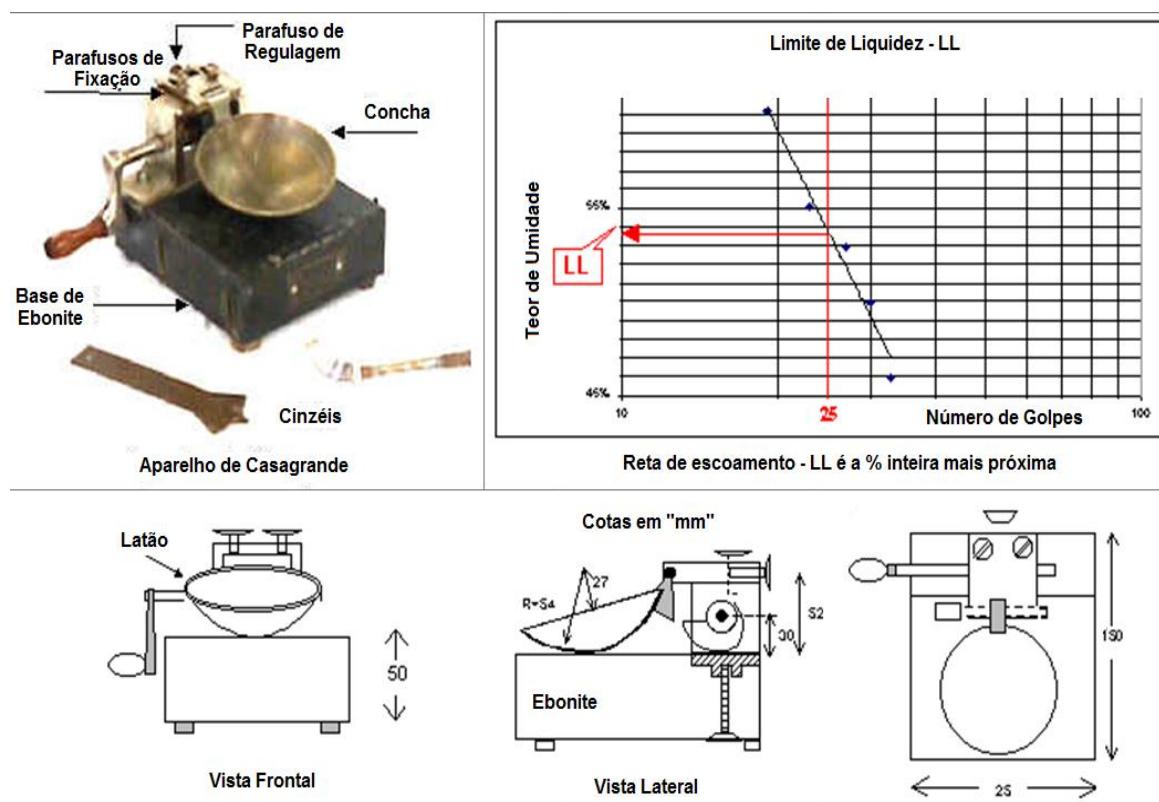
Segundo procedimentos específicos todas as 7 amostras foram submetidas aos processos de caracterização descritos a seguir, descrevendo os equipamentos utilizados na preparação das amostras e no tipo de resultado obtido.

- **Índice de Plasticidade (IP)**

O índice de plasticidade é composto pelo limite de liquidez (ABNT, NBR 6459) e do limite de plasticidade (ABNT, NBR 7180), os quais compõem o limite de

Atterberg. Este se destaca como o principal método de determinação da plasticidade, por sua simplicidade e sensibilidade. Por se tratar de uma propriedade de grande importância, esse foi o método escolhido para determinação dessa importante propriedade, que define parâmetros técnicos para converter uma massa de partículas em um componente com uma geometria definida, mediante aplicação de uma pressão.

O parâmetro de liquidez (LL) indica o maior teor de umidade com que a amostra de um solo pode ser capaz de manter a forma. O aparelho mostrado na Figura 3.2 é utilizado para realização desse ensaio, desenvolvido por Arthur Casagrande e recebeu o seu nome.



relação com outras propriedades como a granulometria. Este resultado é expresso em porcentagem inteira e quando os solos são arenosos, recomenda-se fazer o ensaio de LP antes do ensaio de LL e se este não possuir plasticidade detectável pelos ensaios, adota-se ambos os limites como NP (não-plásticos).

A preparação das amostras para este ensaio seguiu os procedimentos de acordo com as normas técnicas citadas anteriormente.

• Análise Granulométrica (AG)

Esta é uma técnica de fundamental importância na caracterização de matérias-primas, principalmente argilosas, pois a granulometria do material influencia de forma direta na qualidade do processamento e, consequentemente nas propriedades finais do produto.

Realizada com objetivo de quantificar as matérias-primas e classificá-las de acordo com a faixa granulométrica em: argila, silte e areia, segundo a norma ABNT, NBR 6502.

O ensaio foi realizado no granulômetro a laser Cilas, modelo 920L acoplado a um sistema de ultra-som com função dispersante para partículas argilosas. As amostras foram preparadas em granulometria inferior a 35 mesh (ABNT n° 35, 0,59mm). Partindo-se de 2g da matéria-prima com adição de 2 mL de detergente neutro, diluídos em 10 mL de água destilada. O resultado da análise foi fornecido pelo *software The Particle Expert*, que fornece o diâmetro médio (D_M), as curvas de distribuição granulométrica e outros diâmetros de interesse.

• Análise Térmica (AT)

Uma das principais técnicas termoanalíticas utilizadas em argilas é a análise termogravimétrica (ATG). Esta avalia o comportamento de um material em função das temperaturas as quais são submetidas durante o processo de aquecimento imposto, revelando modificações de peso decorrente da oxidação ou decomposição. Possui uma ferramenta para detecção de pequenas variações de declives não perceptivas na curva ATG, chamada de termogravimetria derivativa (DTG) que também representa melhor as temperaturas de início e fim correspondentes ao começo e fim da transformação.

As curvas termogravimétricas foram obtidas utilizando um analisador termogravimétrico (BP Engenharia, RB-3000) em atmosfera a ar e taxa de aquecimento de 10 °C/min, com amostras preparadas em granulometria inferior a 200 mesh (ABNT n° 200, 0,074 mm).

- **Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)**

A técnica de difração de raios X tem sido amplamente utilizada para a determinação de fases cristalinas em materiais cerâmicos. O estudo da composição mineralógica é de fundamental importância no entendimento das propriedades tecnológicas dos produtos de base argilosa. Em argilas, a grande quantidade de quartzo e seu elevado grau de orientação dificultam a identificação e caracterização das demais fases presentes. Além da possibilidade da identificação das fases minerais presentes, também são possíveis estudar as características cristalográficas desses minerais.

As amostras foram classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,074 mm, secas e analisadas em um difratômetro de raios X, XDR-6000 da Shimadzu com tubo de cobre ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) e os parâmetros utilizados foram tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, com varredura 2θ de 2° a 60° e velocidade de 1,5 °/min. A avaliação das fases das matérias-primas foi realizada por comparação entre os picos gerados no difratograma e as cartas padrão existente no sistema JCPDS cadastradas no ICDD (Internacional Center of Diffraction Data).

- **Análise química por fluorescência de raios X (FRX)**

Dificilmente essa técnica caracteriza o material, se não vier acompanhada de alguns dados físicos ou sem a composição mineralógica da matéria-prima. No entanto, é imprescindível para quantificar minerais argilosos e acessórios presentes em uma argila. Trata-se de uma análise muito reproduzível, rápida e precisa.

As amostras foram classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,074mm, secas em estufa ($110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) por 24h e analisadas em um espectômetro por fluorescência de raios X, EDX-700 da Shimadzu em uma atmosfera a vácuo, empregando o método semi-quantitativo para determinação dos elementos presentes nas amostras. A limitação do aparelho encontra-se entre os elementos Sódio (Na^{12}) e o Urânio (U^{92}), no entanto, os principais elementos de interesse são detectáveis e quantificados na forma de óxidos.

3.2. FORMULAÇÃO DAS MASSAS

Todas as matérias-primas foram processadas separadamente obedecendo a seguinte seqüência: (i) secagem em estufa elétrica por 24h para retirada da umidade natural; (ii) destorramento manual utilizando-se almofariz e mão-de-gral; (iii) peneiramento em malha com abertura de 0,59mm (35 mesh); (iv) acondicionamento em sacos plásticos.

As formulações foram desenvolvidas de acordo com a plasticidade e outras características determinadas, utilizando-se argilas das principais jazidas fornecedoras de matérias-primas, com base no uso pelas indústrias, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Formulação das matérias-primas das indústrias.

Formulação	Tipos de Matéria-Prima	
	Argila Plástica	Argila não-plástica
M1	A2	A1
M2	A4	A3
M3	A2	A3
M4	A5	A1
M5	A7	A6

Os dois tipos de matéria-prima foram formulados de acordo com a Tabela 3.3, misturadas com auxílio de um almofariz e em seguida, as formulações foram processadas de acordo com o fluxograma da Figura 3.3.

Tabela 3.3: Misturas utilizadas para a formulação das massas.

Mistura	Tipos de Matéria-Prima	
	Argila Plástica (%)	Argila não-plástica (%)
B	25,0	75,0
C	33,5	66,5
D	50,0	50,0
E	66,5	33,5
F	75,0	25,0
G	100,0	0,0

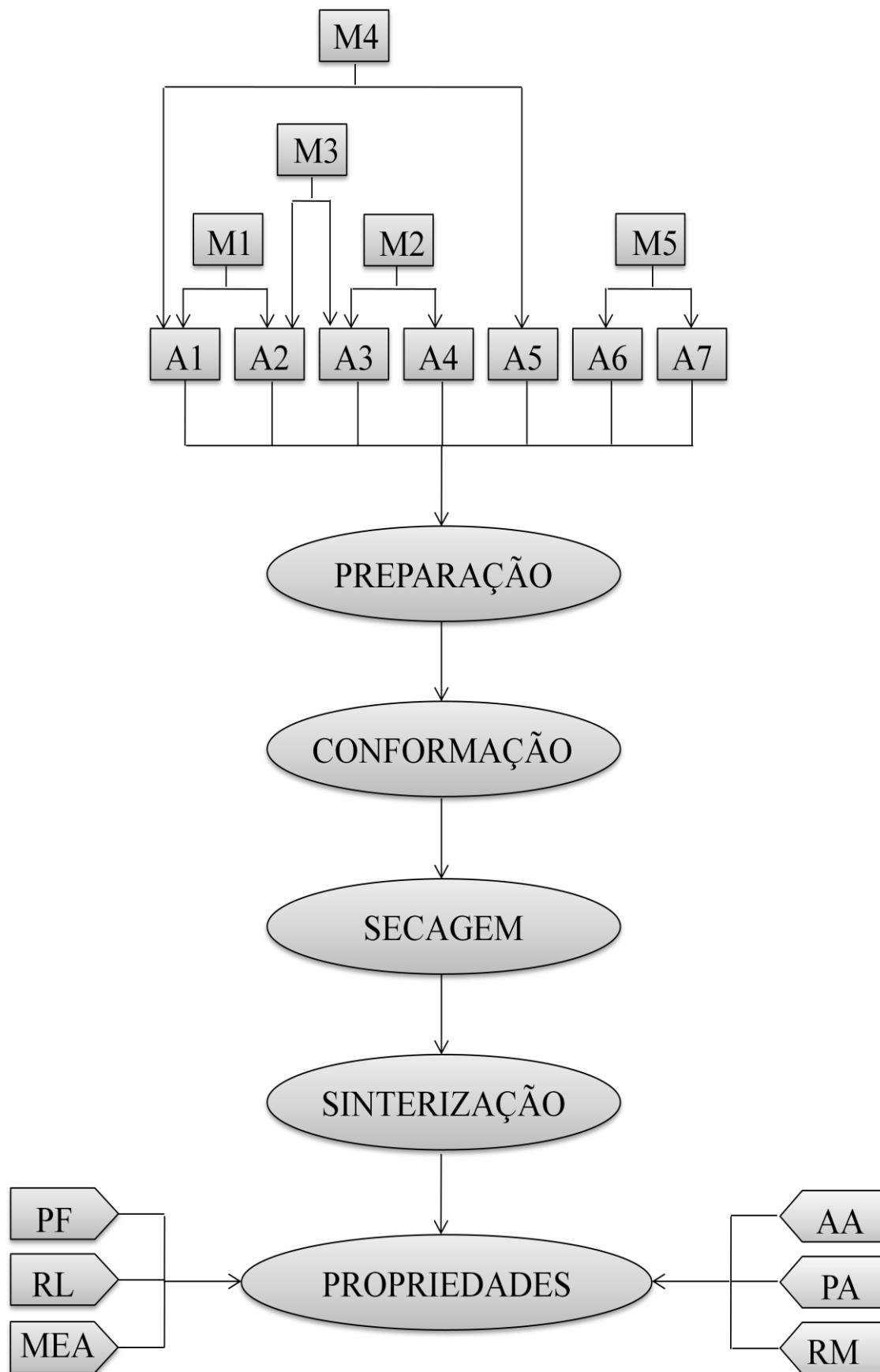


Figura 3.3: Procedimento experimental e caracterização das massas formuladas.

Após o procedimento de formulação, realizou-se o ajuste das massas cerâmicas para a etapa de conformação para o estudo das curvas de queima. O seguinte procedimento foi adotado: (i) adição de 10% de água a fim de manter a umidade de conformação uniforme para todas as amostras; (ii) prensagem uniaxial de simples efeito sob pressão de 25MPa. Para cada formulação foram confeccionados 72 corpos-de-prova, utilizando-se um molde metálico com seção interna de 6 cm x 2 cm, com cerca de 13g de material; (iii) para o tratamento térmico foi realizado uma pré-secagem em estufa elétrica com temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ por 24h, em seguida a queima foi realizada em um forno elétrico (JUNG – modelo 2314 com temperatura máxima de trabalho de 1400°C) sob atmosfera oxidante, obedecendo as variáveis da Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Variáveis de queima das massas cerâmicas.

Numeração dos CPs	Taxa de Aquecimento	Patamar Final	Temperaturas
		min	
1 ao 4	10	10	850°C
5 ao 8	10	10	950°C
9 ao 12	10	10	1050°C

3.3. ELABORAÇÃO DAS CURVAS DE QUEIMA E PROPRIEDADES MECÂNICAS

Quando um material argiloso é queimado ele sofre transformações químicas e físicas devido às reações que ocorrem em temperaturas específicas (DUTRA, 2007).

As curvas de queima é a representação gráfica e simultânea das variações da absorção de água e retração linear da peça com a temperatura de queima, conforme ilustra o modelo visto na Figura 3.4. Assim, tendo-se claramente estabelecido a faixa de absorção desejada e a variação de tamanho admissível no produto final, pode-se usar essa ferramenta para identificar a temperatura na qual essas características são alcançadas. De grande utilidade para o controle de qualidade, a curva nos permite ainda avaliar a tolerância da massa a variações de temperatura e condições de processamento (MELCHIADES, 1996).

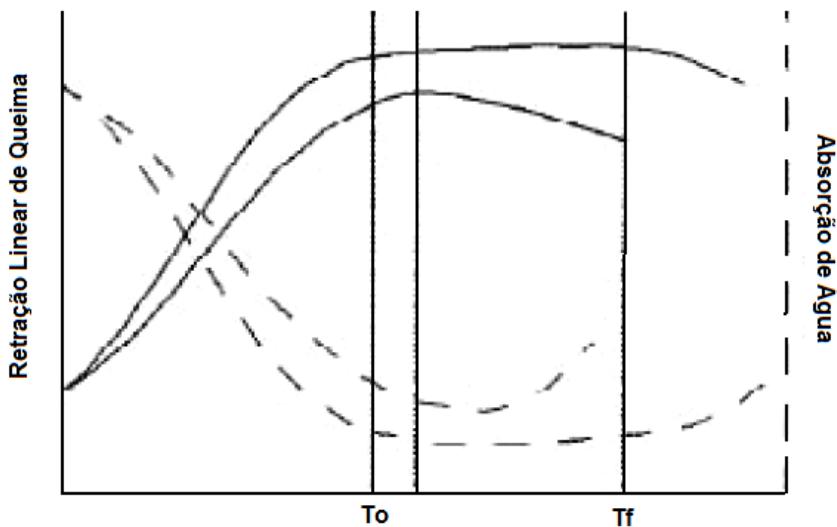


Figura 3.4: Modelo de curva de queima. (SANCHEZ, 2002).

Para o estudo das curvas de queima e análise das propriedades mecânicas, foram examinadas algumas propriedades, como descritas a seguir.

Todos os resultados foram obtidos da média aritmética de quatro corpos-de-prova (CP), apresentando um dado estatístico no mínimo apreciável.

- **Perda de massa ao fogo (PF)**

Determinada pela Equação 3.1, quantifica quanto de massa o material perde em relação ao aumento da temperatura de sinterização. Para determinação dessa propriedade, foi utilizada uma balança analítica TECNAL – Mark 4100 com capacidade de 4,1Kg com precisão de 0,01g.

$$PF(\%) = \frac{(Ms - Mq)}{Mq} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde: Ms é a massa do CP seco, em grama; e Mq a massa do CP queimado, em grama.

- **Retração linear de queima (RLq)**

É obtida com base na variação dimensional linear dos corpos-de-prova sinterizados (Equação 3.2). Foi utilizado um paquímetro digital Starret 721, com precisão de 0,01mm, realizando medidas de comprimento dos corpos secos e após o processo de queima.

$$RLq(\%) = \frac{(Lo - Lf)}{Lf} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde: Lo é o comprimento do CP seco, em centímetro; e Lf o comprimento do CP queimado, em centímetro.

- **Absorção de água (AA)**

A absorção de água é o valor em porcentagem, da massa de água absorvida pelo corpo após a queima. Determinada por imersão em água (Equação 3.3) segue o seguinte procedimento: os corpos cerâmicos são pesados imediatamente após a saída do forno em balança analítica; consecutivamente, foram submersos em água destilada durante 24 horas, após esse tempo foram retirados do recipiente, removido o excesso da água superficial e imediatamente apóis, pesados para verificação de suas novas massas.

$$AA(\%) = \frac{(Mu - Mq)}{Mq} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde: Mu é a massa do CP úmido, em grama; e Mq a massa do CP queimado, em grama.

- **Porosidade aparente (PA)**

O cálculo da porosidade aparente fornece o provável percentual do volume de poros abertos, após a sinterização, dos corpos-de-prova em relação ao seu volume total. É avaliada (Equação 3.4) através do método de Arquimedes utilizando-se como fluido de imersão a água na temperatura ambiente.

$$PA(\%) = \frac{(Mu - Mq)}{(Mu - Mi)} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde: Mu é a massa do CP úmido, em grama; Mq a massa do CP queimado, em grama; e Mi a massa do CP imerso em água, em gramas.

- **Massa específica aparente (MEA)**

A massa específica aparente é definida como a relação entre a massa de uma amostra e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros, determinada pela Equação 3.5.

$$MEA(g/cm^3) = \frac{Mq}{(Mu - Mi)} \quad (3.5)$$

Onde: M_u é a massa do CP úmido, em grama; M_q a massa do CP queimado, em grama; e M_i a massa do CP imerso em água, em gramas.

- **Resistência mecânica (RM)**

A resistência mecânica dos corpos-de-prova prensados foi determinada pela tensão ou carga de ruptura à flexão (MRF) em 3 pontos, utilizando-se uma máquina de ensaios mecânicos da Zwick/Roell. O ensaio foi realizado com uma velocidade de 0,5 mm/min e o MRF calculado de acordo com a Equação 3.6.

$$MRF(MPa) = \frac{3C.A}{20a.b^2} \quad (3.6)$$

Onde: C é a carga de ruptura, em quilograma-força; A é a distância entre os pontos de apoio do suporte, em centímetro; a é a largura do CP, em centímetro; e b a altura do CP, em centímetro.

3.3.1. CARACTERIZAÇÃO FINAL

Para a caracterização final dos produtos foram utilizadas algumas técnicas básicas de caracterização para verificar se as fases formadas após o processo de queima equivalem ao esperado.

- **Difração de raios X**

Utilizou-se o mesmo equipamento da análise de DRX da caracterização das matérias-primas. A análise foi realizada nas formulações compactadas sob os diferentes ciclos de queima, citados anteriormente.

As amostras queimadas foram trituradas manualmente e classificadas por peneiramento na granulometria inferior a 0,074 mm, secas e analisadas em um difratômetro de raios X (XRD-6000, Shimadzu) utilizando-se as seguintes condições: radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, ângulo de varredura 2θ de 2° a 60°).

- **Microscopia eletrônica de varredura**

A análise foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura (SSX-550, Shimadzu) pertencente ao Laboratório de Ensaios de Materiais do CTGás. As amostras foram individualmente preparadas para microscopia eletrônica de varredura (MEV) por meio de lixamento da superfície a ser analisada e em alguns casos foram analisadas as superfícies de fratura da parte externa e interna do material.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERÍSTICAS DA CADEIA PRODUTIVA

A maioria das jazidas exploradas pelas indústrias cerâmicas ocorre nas várzeas dos rios, lagoas e açudes. Os principais fornecedores de argila da região da bacia do Seridó são o açude de Cruzeta, Caldeirão em Parelhas, Gargalheiras em Acari (Figura 4.1), Itans em Caicó, Zangarelhas em Jardim do Seridó e o Rio Totoró em Currais Novos. De todos, o mais importante é o açude de Cruzeta (Figura 4.2), que abastece a maioria das cerâmicas do Seridó.



Figura 4.1. Jazida Bulhões em Acari.



Figura 4.2. Jazida Cauaçu em Cruzeta.

O processo de extração das argilas é realizado quase que em sua totalidade de forma mecânica, com o uso de retroescavadeiras e o transporte da jazida até a olaria é feito principalmente por caminhões.

O processo de sazonamento do material nas indústrias pesquisadas tem descanso médio de 30 de máximo de 720 dias (Figura 4.3). A exposição do material extraído às imprecisões provoca a lavagem de sais solúveis, o alívio de tensões nos blocos de argilas melhora sua plasticidade e homogeneiza a distribuição de umidade (SOARES, 2004). O tempo de descanso da massa após a adição da umidade é de oito dias para mais da metade das empresas (Figura 4.4).



Figura 4.3. Descanso da matéria-prima no pátio das indústrias.

Preparação do Traço

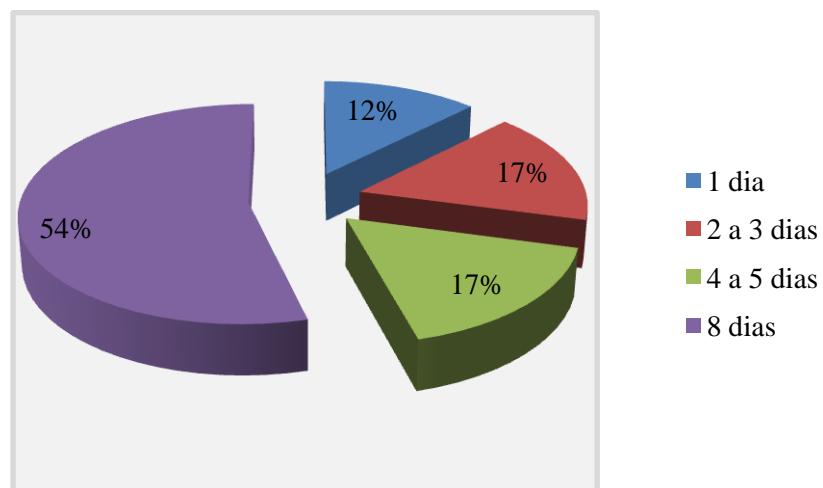


Figura 4.4. Tempo médio de descanso da massa para homogeneização da distribuição da umidade.

Quando uma única argila não é própria para fabricação dos produtos cerâmicos, ocorre a mistura de duas ou mais argilas. A maior parte das indústrias da região adota a mistura de duas argilas em seu processo produtivo, como mostra a Figura 4.5. Os procedimentos de dosagem da matéria-prima são de pouca precisão, ocorrendo geralmente pela contagem do número de *conchas* de pás-carregadeiras.

Número de Argilas Utilizadas pelas Olarias

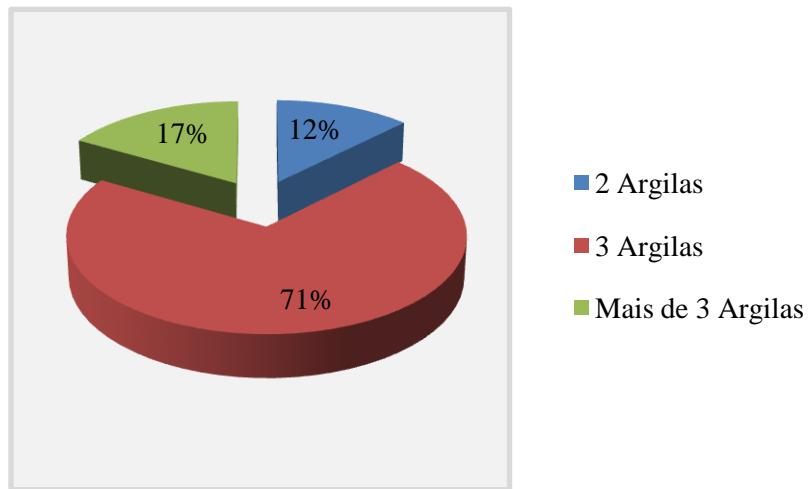


Figura 4.5. Número de argilas usadas na composição da massa cerâmica.

As indústrias cerâmicas apresentam uma grande homogeneidade em relação aos equipamentos utilizados no processo produtivo. A quantidade desses equipamentos varia conforme o porte da empresa. A maioria possui equipamentos como misturador, correias-transportadoras, laminador, desintegrador, e em seguida a matéria-prima é encaminhada para a etapa de conformação. A Figura 4.6 mostra a seqüência de equipamentos utilizados no processo de preparação da matéria-prima para conformação.





Figura 4.6. Equipamentos usados na preparação da massa pré-conformação.

Para o processo de moldagem todas as empresas utilizam apenas extrusoras com módulo de vácuo e cortadores no final da linha (Figura 4.7), sem a etapa de prensagem. A manutenção dos equipamentos é realizada geralmente na própria olaria ou em oficinas especializadas.



Figura 4.7. Maromba à vácuo + cortadores.

Após a moldagem, os produtos são encaminhados à etapa de secagem. A secagem pode ser feita nos pátios das empresas, galpões ou em estufas, sendo que a secagem em estufa não é utilizada pelas indústrias da região. O processo de secagem mais utilizado varia de acordo com a estação do ano, no verão é mais utilizado o processo de secagem no pátio, e no inverno em galpões. O processo de secagem em galpões, é utilizado também quando a temperatura ambiente é muito elevada e nesses casos a secagem no pátio provoca defeitos dimensionais na peça conformada. A Figura

4.8 e 4.9 a seguir representa o tempo médio de secagem das peças no pátio e nos galpões no verão. O tempo de secagem no inverno pode duplicar ou até triplicar dependendo das condições do clima, sendo o processo de secagem no pátio inutilizado sob essas condições.

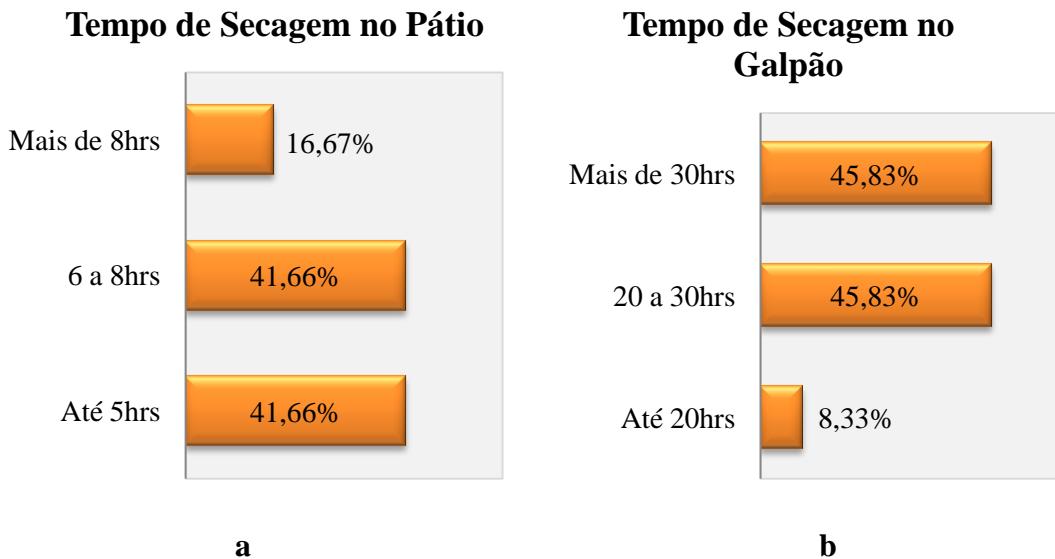


Figura 4.8. Tempo médio de secagem (a) no pátio e (b) nos galpões.



Figura 4.9. Processo de secagem (a) no pátio e (b) nos galpões.

Os fornos utilizados pelas empresas da região são do tipo intermitente, o que está relacionada ao predomínio de empresas de pequeno porte com estrutura familiar. Pode-se ver na Figura 4.10, um forno intermitente do tipo caipira. Este tipo de forno possui geometria retangular e é coberto por telhas durante a queima. O carrego e

descarreço é feito pelo lado oposto ao de entrada da lenha. Produz até 20% de telhas de primeira, 60% a 80% de telhas de segunda, com até 20% de perdas, com consumo médio de 0,8 m³ de lenha por tonelada de produto sinterizado.



Figura 4.10. Forno intermitente tipo caipira.

Os combustíveis utilizados pelas olarias são de vários tipos, com predominância do uso da lenha (Figura 4.11) e outros resíduos de outras indústrias, como o pó de madeira e a casca de coco. Os principais tipos de lenha utilizados são a algaroba, jurema, catingueira, cajueiro, feijão brabo, aveloz e pereiro, como mostra a Figura 4.12, respectivamente.



Figura 4.11. Estoque de lenha no pátio da empresa.

Figura 4.12. Tipos de lenhas utilizadas pelas empresas.

Embora o controle dos parâmetros de queima seja fundamental para reduzir perdas e obter um produto final de boa qualidade; poucas indústrias o realizam. A maioria destas não tem conhecimento da qualidade dos produtos, pois não fazem o controle tecnológico dos mesmos. O único parâmetro usado para classificação do produto é a uniformidade da cor verificada após a queima do mesmo.

4.1.1. MERCADO CONSUMIDOR

O mercado consumidor é local, com grande parte da produção cerâmica absorvida pela indústria da construção civil da região. O principal consumidor dos produtos são pequenos comerciantes que abastecem o mercado regional com produtos para construção civil. Uma pequena parte da produção ainda é exportada para estados vizinhos como a Paraíba, Pernambuco e Alagoas.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A Figura 4.13 apresenta a distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas. Nesta Figura as diferentes faixas de tamanho de partículas estão associadas à fração argila e silte, bem com areia fina e areia grossa, de acordo com a classificação granulométrica dos solos da International Society of Soil Science. De acordo com a Figura pode-se verificar uma variação relativamente alta do diâmetro das partículas com frações acumuladas, principalmente entre as matérias-primas A1 e A4.

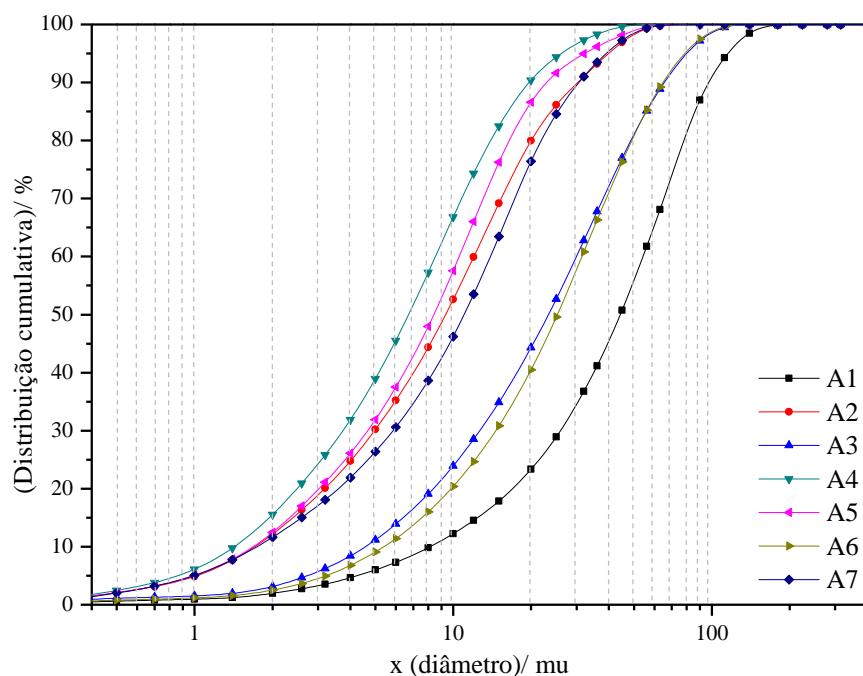


Figura 4.13. Curva granulométrica das matérias-primas em estudo.

A Tabela 4.1 apresenta as porcentagens granulométricas das matérias-primas estudadas conforme a classificação adotada pela ABNT, NBR 6502, 1995.

Tabela 4.1. Classificação das matérias-primas, segundo NBR 6502, 1995.

Matéria-prima	< 2 μm	2 - 63 μm	63- 200 μm
	Argila	Silte	Areia
	%		
A1	1,96	66,15	31,89
A2	12,20	87,80	0,00
A3	3,15	85,75	11,1
A4	15,58	84,41	0,00
A5	12,49	87,51	0,00
A6	2,50	86,74	10,76
A7	11,65	88,35	0,00

Constatou-se que 3 matérias-primas das 7 estudadas são constituídas por uma pequena quantidade de argila, e um elevado teor de silte e areia (A1, A3 e A6), tendo estas diâmetro médio partículas superior às demais. Contudo, as matérias-primas A2, A4, A5 e A7 não apresentam areia na composição.

A Tabela 4.2 contém os resultados de distribuição de tamanhos de partículas das matérias-primas estudadas nas frações acumuladas de 10%, 60% e 90%, assim como o diâmetro médio de partículas (D_M).

Observa-se que a matéria-prima A4 apresenta menor diâmetro médio de partículas, consequentemente, distribuição de tamanho de partículas mais fina em relação às demais, evidenciado pelas percentagens retidas nas diferentes frações granulométricas, seguida das amostras A5, A2 e A7. A matéria-prima A1 apresenta granulometria mais grossa com diâmetro médio de partículas maior que 50 μm e mais de 70% das partículas com tamanho superior a 20 μm . As amostras A6 e A3 formam o grupo intermediário com mais de 50% das partículas com granulometria superior a 20 μm e diâmetro médio de partículas de 31, 10 μm e 30,13 μm , respectivamente.

Tabela 4.2. Distribuição de tamanhos, e diâmetro médio de partículas das matérias-primas.

Matéria-prima	10%	60%	90%	D_M	< 2μm	2 - 20μm	>20μm
	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	%		
A1	8,11	54,09	99,25	50,18	1,96	21,39	76,65
A2	1,68	12,02	30,40	13,04	12,20	67,78	20,02
A3	4,54	29,91	66,05	30,13	3,15	41,13	55,72
A4	1,42	8,53	19,71	9,12	15,58	74,82	9,60
A5	1,65	10,55	23,27	11,13	12,49	74,10	13,41
A6	5,37	31,44	65,10	31,10	2,50	38,01	59,49
A7	1,72	13,88	30,80	14,03	11,65	64,11	23,58

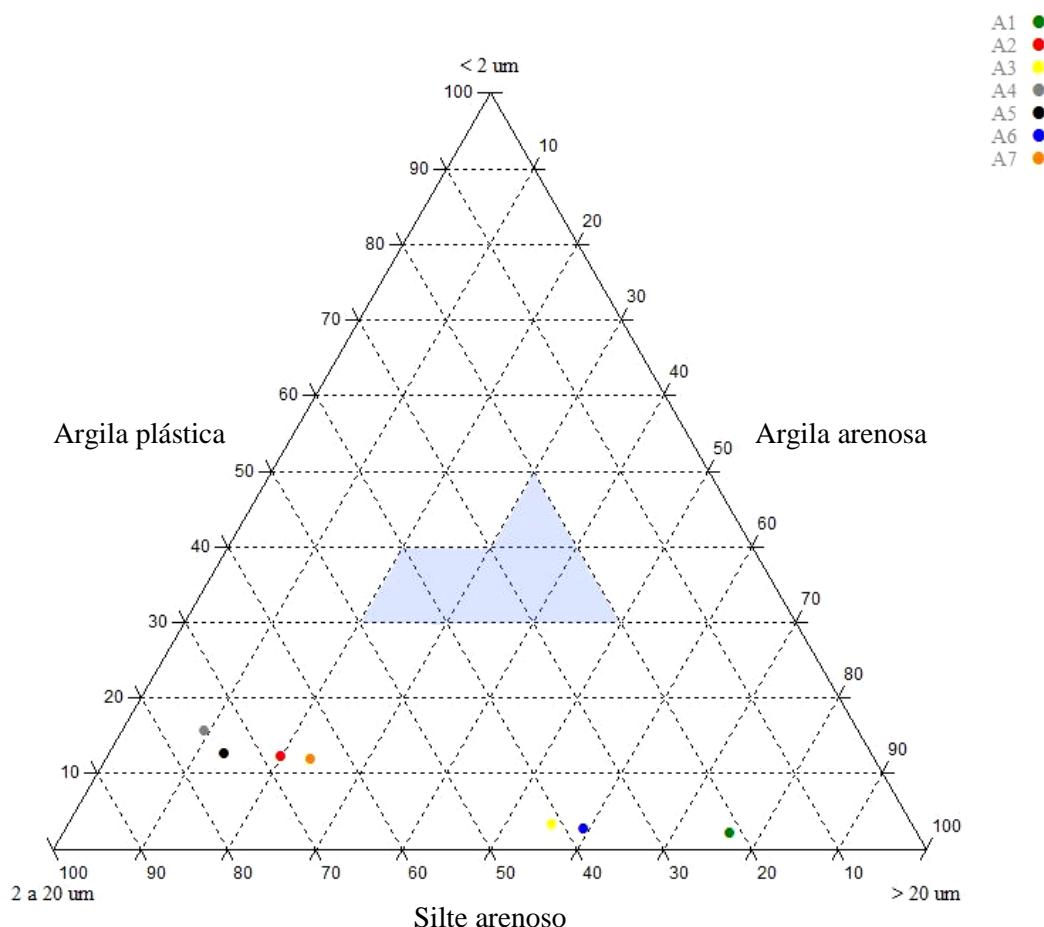


Figura 4.14. Diagrama granulométrico de Winkler.

A Figura 4.14 representa o diagrama de Winkler para as matérias-primas em estudo. Pode-se notar claramente a divisão dos grupos de matérias-primas já analisadas anteriormente. Nota-se que todas as amostras encontram-se fora da região de matéria-prima favorável a produção de telha, conclui-se então, que nenhuma das matérias-primas em estudo pode ser processada individualmente para obtenção de telhas cerâmica, levando ao uso de formulações para atender pré-requisitos.

4.2.2. AVALIAÇÃO DA PLASTICIDADE

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos limites de Atterberg e a classificação das matérias-primas estudadas.

Tabela 4.3. Limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade, classificação e tipo de matérias-primas.

Matéria-prima	LL	LP	IP	Classificação
	% %			
A1	ND*	ND	0,0	Não-plástica
A2	40,87	21,50	19,37	Altamente plástica
A3	ND	ND	0,0	Não-plástica
A4	34,21	23,63	10,58	Mediamente plástica
A5	41,09	22,98	18,11	Altamente plástica
A6	ND	ND	0,0	Não-plástica
A7	34,96	20,41	14,55	Mediamente plástica

*ND – não determinado

Conforme a Tabela 4.3, observa-se que a matéria-prima A2 foi a que apresentou maior índice de plasticidade, seguida da matéria-prima A5. Essa plasticidade não depende somente da presença da fração argilosa, mas também é influenciada pela morfologia das partículas, composição química e mineralógica.

As matérias-primas A1, A3 e A6 não apresentaram plasticidade, sendo sua principal aplicação como material desplastificantes ou reguladoras de plasticidade na massa cerâmica.

Sabendo-se da notória ligação entre a granulometria e a plasticidade, classificamos as matérias-primas A2 e A5 como altamente plásticas, a A4 e A7 como

mediamente plástica e em contraponto, as matérias-primas A1, A3 e A6 como não-plásticas.

4.2.3. ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA

A Tabela 4.4 apresenta os resultados de análises químicas das argilas. As amostras A1, A6 e A7 apresentam um teor de sílica superior a 50%, assim como menores teores de Fe_2O_3 . As demais argilas apresentam valores semelhantes de teor de SiO_2 e Al_2O_3 , e percentagem de Fe_2O_3 superior a 13%, sendo que as argilas A2 e A5 podem ser consideradas como semelhantes em toda sua composição.

Tabela 4.4. Composição química das argilas, obtidos por Fluorescência de raios X.

Matérias-primas	Principais Elementos, (%) em peso									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	TiO_2	MgO	MnO	ZrO_2	Outros
A1	57,22	24,42	5,52	3,72	2,55	1,78	1,46	0,12	0,12	3,09
A2	44,84	26,66	17,29	1,67	2,95	1,31	3,22	0,23	-	1,83
A3	42,60	29,21	13,87	1,53	4,58	1,66	3,97	0,20	0,09	2,29
A4	46,45	23,43	15,79	3,80	2,63	1,61	2,56	0,19	0,06	3,48
A5	44,60	25,84	17,62	1,98	3,33	1,86	2,03	0,16	0,04	2,54
A6	52,19	26,61	8,31	2,83	2,93	1,96	2,88	0,13	0,06	2,10
A7	52,28	24,60	10,89	4,44	3,60	1,26	-	0,14	0,08	2,71

A semelhança na composição das argilas pode ser visualizada através da representação das composições em um diagrama ternário, considerando como vértices o SiO_2 , como indicativo de sílica livre, o Al_2O_3 , como indicativo da presença de argilominerais e por último o vértice constituído pela soma de Fe_2O_3 , K_2O , CaO e MgO , (Figura 4.15) considerada a soma de componentes presentes em óxidos livres, carbonatos e feldspatos.

Como alternativa para melhor avaliação das diferenças observadas nas argilas, com base em sua composição química, foi construído um novo diagrama ternário considerando como vértices o Fe_2O_3 , maior responsável pela coloração após sinterização; o teor de K_2O , como indicativo da presença de fundentes, e a soma $\text{CaO}+\text{MgO}$ como indicativo de carbonatos. (Figura 4.16).

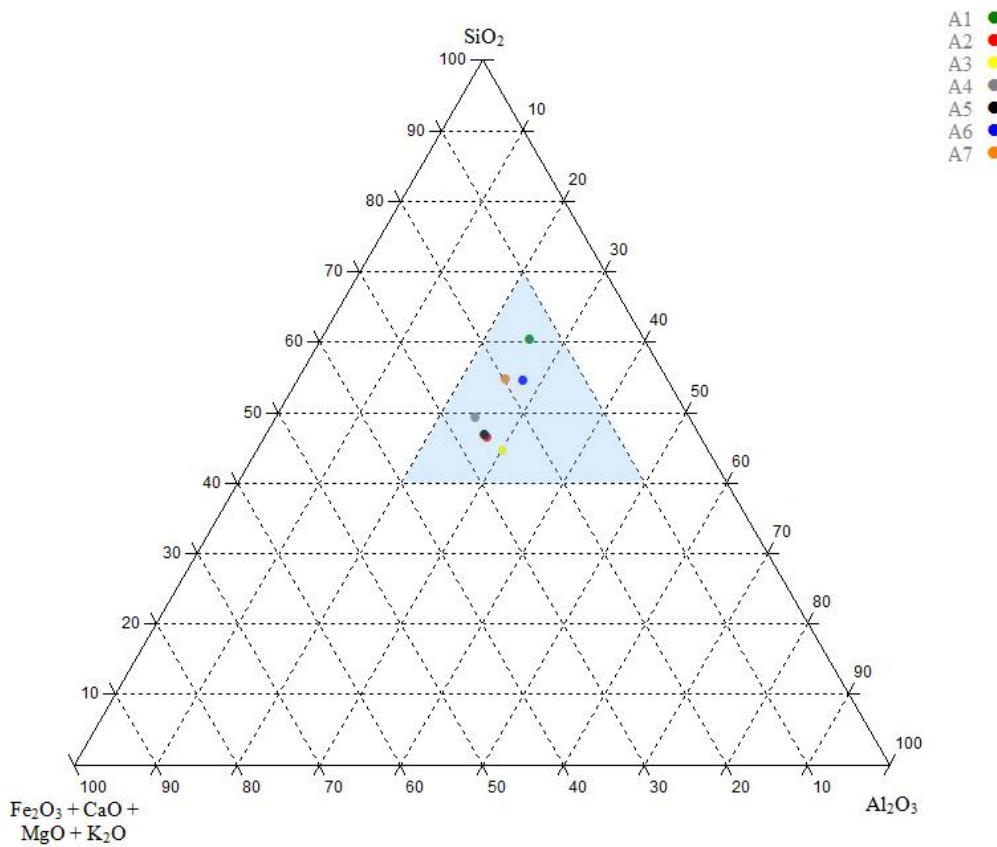


Figura 4.15. Diagrama ternário do sistema SiO₂ - Al₂O₃ - Fe₂O₃+K₂O+CaO+MgO.

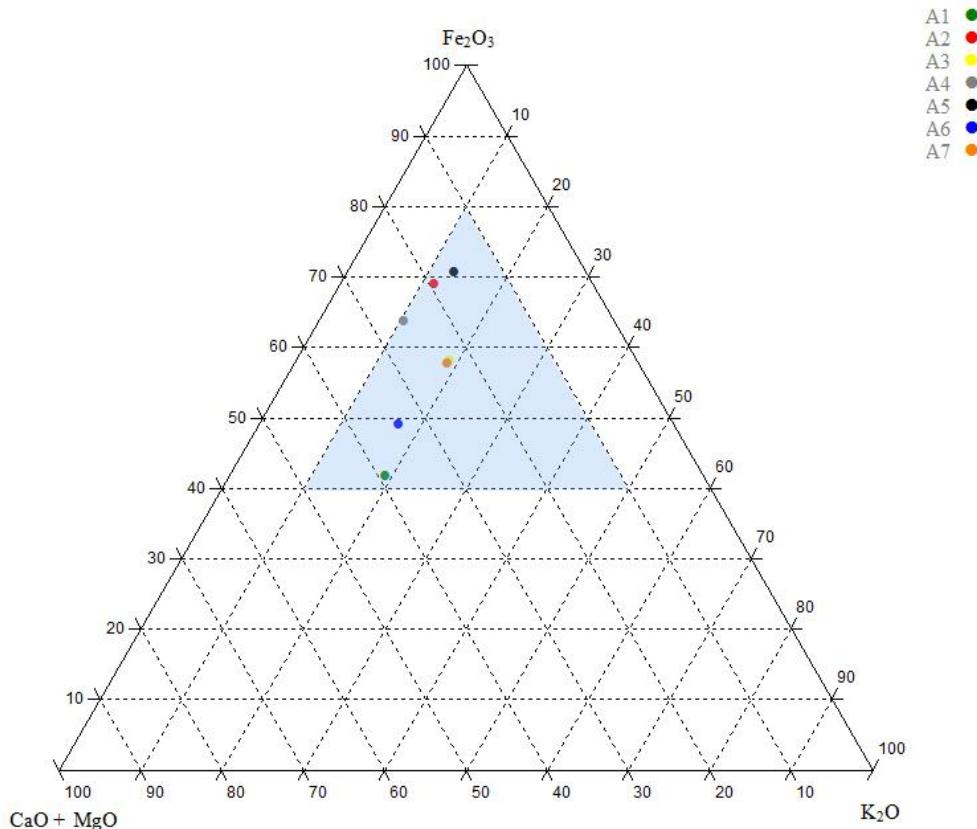


Figura 4.16. Diagrama ternário do sistema Fe₂O₃ - K₂O - CaO+MgO.

Neste diagrama podemos notar que em todas as amostras a presença de materiais fundentes é reduzida. Como observado anteriormente às matérias-primas A2 e A5 devem ser consideradas como maiores fontes de ferro, empregadas para conferir a coloração vermelha às telhas. Quanto às demais existe a tendência de apresentar variações em relação às proporções de carbonatos e óxidos livres.

A Figura 4.17 contém os difratogramas das matérias-primas em estudo. Com base nos resultados obtidos nas análises, verificou-se que todas as argilas têm como características principais a presença de argilominerais na forma de ilita, em forma majoritária, e caulinita, que se caracteriza como um excelente formador de estrutura em uma ampla faixa de temperatura de queima. Assim como previsto inicialmente, foi detectado o mineral acessório quartzo, presente em todas as matérias-primas. Existe ainda a identificação de linhas características da presença do material fundente albita, exceto para a amostra A2 que apresenta ainda o argilomineral montmorilonita e a mica biotita, que é um silicato de alumínio e ferro, que contém também manganês e titânio. Estas informações estão em conformidade com as observações feitas com base apenas na análise química.

A combinação dos dados de difratometria de raios X e a análise química, além de introduzir uma correção no teor de quartzo presente na amostra através da curva de quartzo livre, permitiram a construção da Tabela 4.5 onde são apresentados valores de análise mineralógica quantitativa. Os resultados foram obtidos utilizando o método proposto por pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Tabela 4.5. Análise racional das matérias-primas.

Matéria-prima	Minerais argilosos					Minerais não-argilosos				
	I	K	Mt	Σ	Q	M	A	B	Outros	Σ
A1	57,11	-	-	57,11	20,75	4,35	6,98	-	10,81	42,87
A2	42,08	30,22	15,58	87,88	4,04	-	-	2,54	5,54	12,12
A3	50,69	27,63	-	78,32	4,25	-	12,38	-	5,05	21,65
A4	37,26	-	-	37,26	21,58	-	30,67	-	10,49	62,64
A5	30,85	30,74	-	61,59	18,29	-	13,48	-	6,64	38,41
A6	32,48	37,74	-	70,22	18,26	-	9,87	-	1,65	29,81
A7	60,58	-	-	60,58	16,25	-	8,14	-	15,03	39,40

*I – Ilita, K – Caulinta, Mt – Montmorilonita, Q – Quartzo, M – Mica Muscovita, A – Albita, B – Mica Biotita

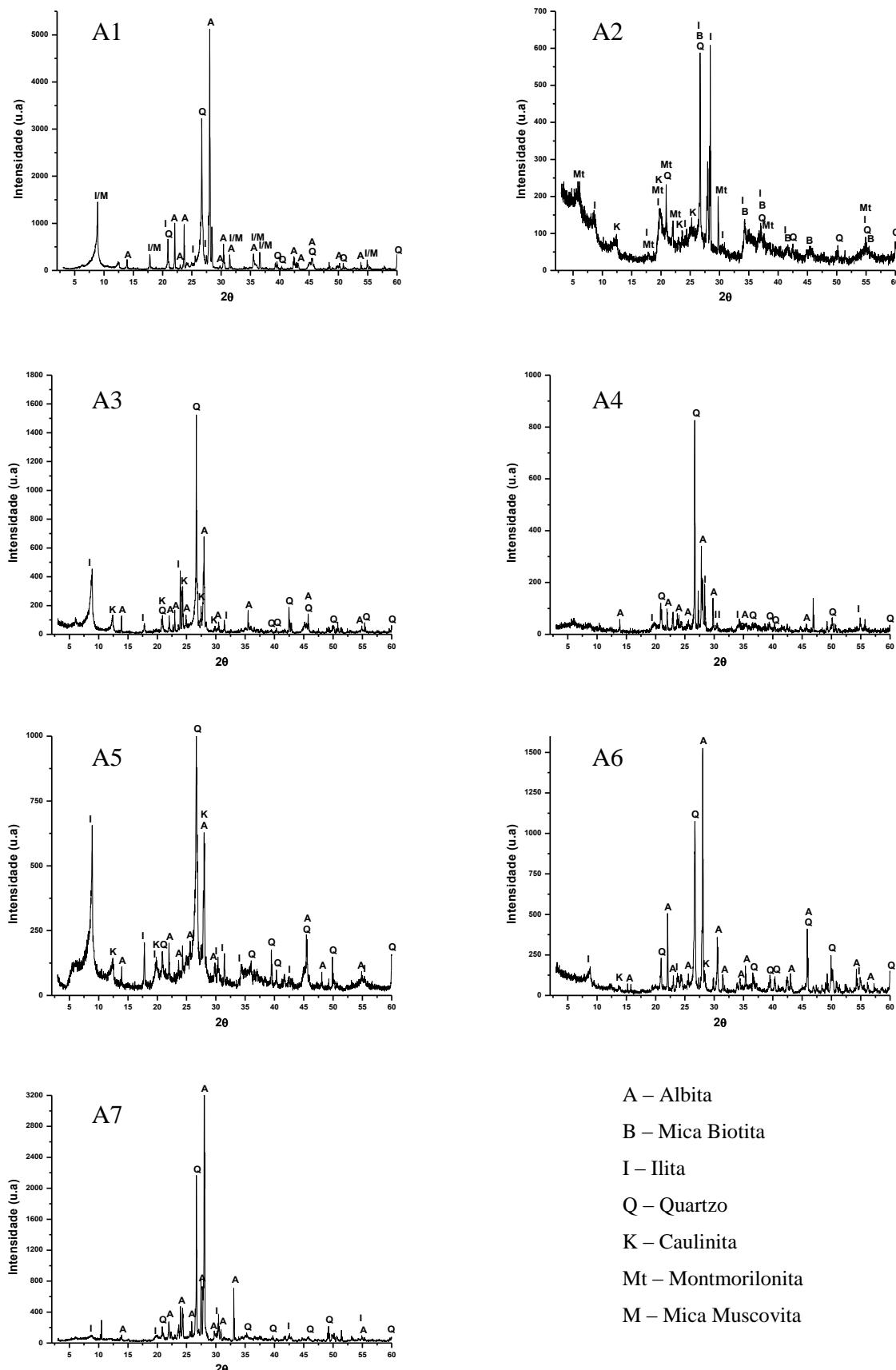


Figura 4.17. Difractograma das matérias-primas.

4.2.4. ANÁLISE TÉRMICA

A Figura 4.18 apresenta a curva térmica diferencial das matérias-primas analisadas.

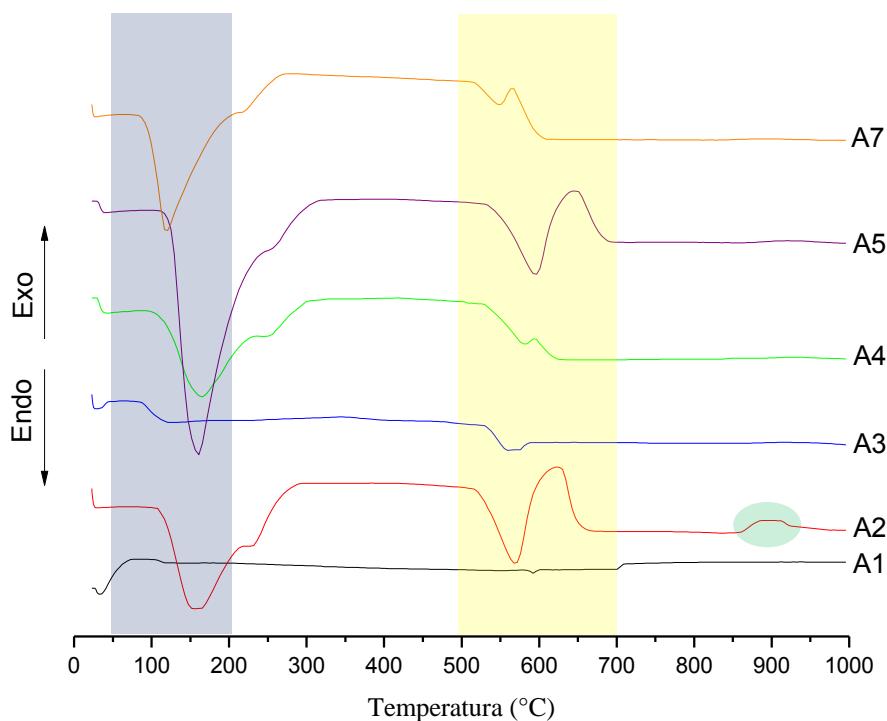


Figura 4.18. Curva térmica diferencial das matérias-primas.

Em todas as amostras verificam-se picos endotérmicos com no máximo 160°C (região azul) decorrente da perda de água de umidade intercalada entre camadas e de água adsorvida. Os efeitos exotérmicos, mais acentuado nas amostras A2 e A5 com máximo de aproximadamente 650°C, e confirmado pelo difratograma são resultado da pirólise e combustão da matéria orgânica, freqüentemente pronunciados nesse tipo de material.

A região amarela da Figura 4.18, representa picos endotérmicos que se iniciam a 500°C e se completam até 600°C, decorrente da reação de desidroxilação da caulinita, nessas condições, forma-se a metacaulinita.

O pico exotérmico, demarcado pela região verde, para a amostra A2 é a formação de novas fases a partir da decomposição da metacaulinita, que ocorre a aproximadamente 910°C.

4.3. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS FORMULAÇÕES

Os seguintes resultados referem-se às propriedades tecnológicas das formulações designadas por M1, M2, M3, M4 e M5 (Tabela 3.2).

4.3.1. PERDA DE MASSA AO FOGO

As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 contêm os resultados da perda de massa das formulações estudadas nas temperaturas de queima apresentadas.

É notório para as formulações M1, M4 e M5 a variação direta da perda de massa com aumento da perda de massa com a adição da matéria-prima plástica e de menor granulometria, atingindo o máximo para a formulação M4-G a 1050 °C com o valor de perda de massa de 9,0%.

Outra característica importante é a uniformidade para os valores apresentados em todas as formulações, com variação entre 3,8 % (M1-B a 850 °C) até perdas de massa da ordem de 8 %, influenciada pela semelhança entre as matérias-primas usadas neste trabalho.

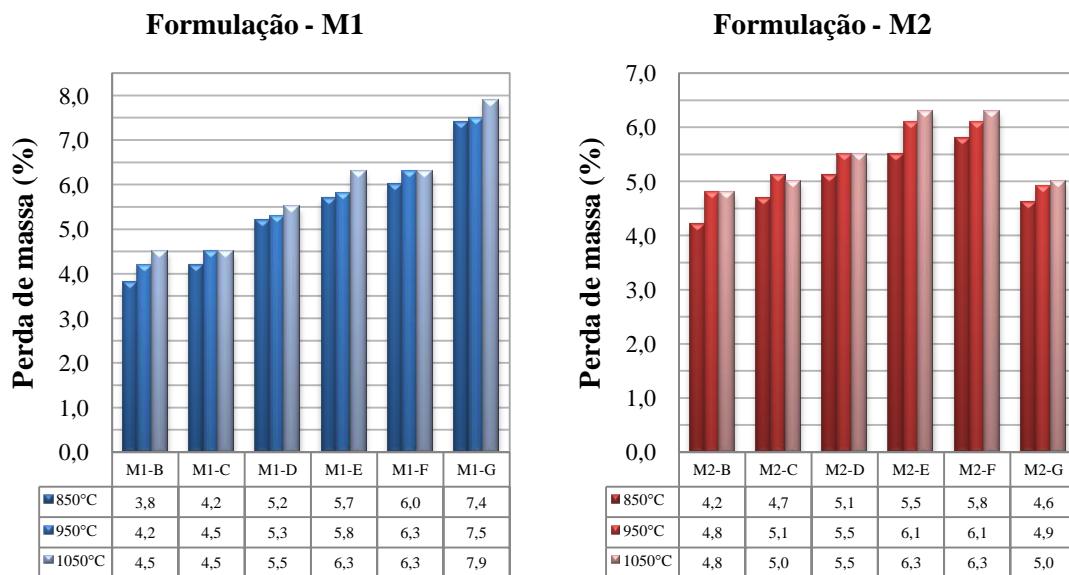


Figura 4.19. Comparação da variação da PF para as formulações M1 e M2.

Observa-se que para a formulação M2, composta pelas matérias primas A3 e A4, a adição de matéria-prima mediamente plástica quase não influencia na perda de massa da mistura, uma vez que a matéria-prima A4 com índice de plasticidade aproximado de

10,58 % possui composição química semelhante à matéria-prima A3, conforme verificado na Figura 4.19.

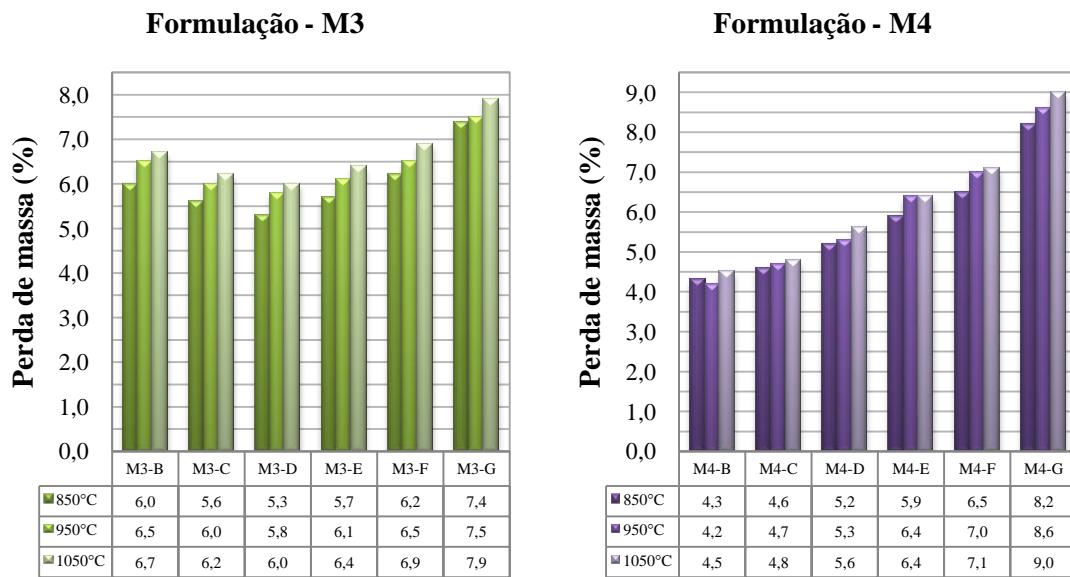


Figura 4.20. Comparação da variação da PF para as formulações M3 e M4.

Para a formulação M4, a adição da matéria-prima plástica influenciou a perda de massa da mistura de forma mais intensa que as demais. Fato ocorrido devido a maior diferença de composição apresentada entre as matérias-primas A1 e A5. Verifica-se que para a mistura B (75 % de A1 e 25 % de A5) para a formulação G (100% de A5), ocorreu um aumento de 4,2 % para 9,0 %.

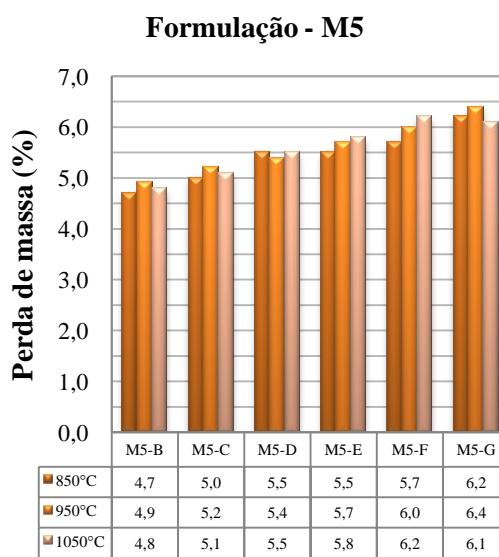


Figura 4.21. Variação da PF para a formulação M5.

4.3.2. CURVAS DE QUEIMA

Foram analisadas para todas as formulações dos materiais as curvas de queima. As Tabelas 4.6 e 4.7 contém os resultados da retração linear de queima com seus respectivos desvios padrões nas temperaturas de queima.

Tabela 4.6. Retração linear de queima das formulações M1, M2 e M3.

Misturas	Formulações								
	M1			M2			M3		
	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C
B	-0,7±0,1	-0,6±0,1	-0,1±0,1	-0,7±0,0	-0,6±0,2	0,0±0,2	-0,3±0,0	0,1±0,0	0,5±0,0
C	-0,4±0,1	-0,4±0,1	0,0±0,0	-0,5±0,1	-0,5±0,0	0,2±0,1	-0,3±0,1	0,0±0,0	1,2±0,1
D	-0,3±0,1	-0,1±0,1	0,5±0,1	-0,2±0,1	-0,2±0,1	0,5±0,0	-0,3±0,0	-0,2±0,0	0,8±0,1
E	-0,1±0,1	0,0±0,1	0,8±0,1	-0,1±0,0	0,0±0,1	1,1±0,0	-0,1±0,0	0,0±0,0	1,1±0,1
F	-0,1±0,3	0,1±0,1	1,0±0,0	0,0±0,0	0,1±0,0	1,3±0,1	0,0±0,0	0,1±0,1	1,2±0,1
G	0,4±0,0	0,8±0,0	2,7±0,1	-0,3±0,0	-0,3±0,1	0,2±0,0	0,4±0,0	0,8±0,0	2,7±0,1

Tabela 4.7. Retração linear de queima das formulações M4, e M5.

Misturas	Formulações					
	M4			M5		
	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C
B	-0,8±0,0	-0,7±0,1	-0,4±0,2	-0,5±0,1	-0,4±0,0	0,0±0,1
C	-0,5±0,2	-0,4±0,0	0,1±0,0	-0,3±0,0	-0,2±0,0	0,4±0,0
D	-0,4±0,0	-0,3±0,0	0,4±0,1	-0,2±0,0	-0,1±0,1	0,7±0,0
E	-0,2±0,0	0,0±0,1	0,8±0,0	-0,1±0,1	0,0±0,0	0,9±0,0
F	-0,1±0,1	0,1±0,0	1,3±0,0	0,0±0,0	0,1±0,0	1,0±0,1
G	0,6±0,1	1,2±0,0	3,1±0,1	0,2±0,1	0,3±0,1	1,2±0,5

Verifica-se uma clara analogia entre os valores encontrados para retração linear de queima e a perda de massa ao fogo correspondente das formulações. A maior retração linear das formulações estudadas foi constatada na formulação M4, sinterizada a 1050 °C, seguida das formulações M1 e M3, também sinterizada a 1050 °C, comprovando a relação entre retração e temperatura de queima, com valores que superam 2 %.

De forma geral, observa-se que a adição de matéria-prima plástica a formulação provoca um aumento nos valores de retração, fato este ligado ao aumento da quantidade de matéria orgânica na amostra, que provoca uma maior perda de massa do material. Os valores negativos encontrados para algumas formulações com maior quantidade de material não-plástico e sinterizados a temperatura de 850 e 950 °C denotam uma expansão do material durante o processo de queima.

Comparando os dados obtidos para a temperatura de 950 °C, verifica-se que na formulação M4 apresenta o menor valor de retração para a amostra B, seguida das formulações M1 e M2, com valores de aproximadamente -0,6 %.

O efeito da temperatura evidenciou-se de melhor forma para a formulação M4, analisada a temperatura de 950°C, onde a adição da matéria-prima A1 reduziu a retração de 1,2 % para -0,7 %, como representado na Figura 4.22.

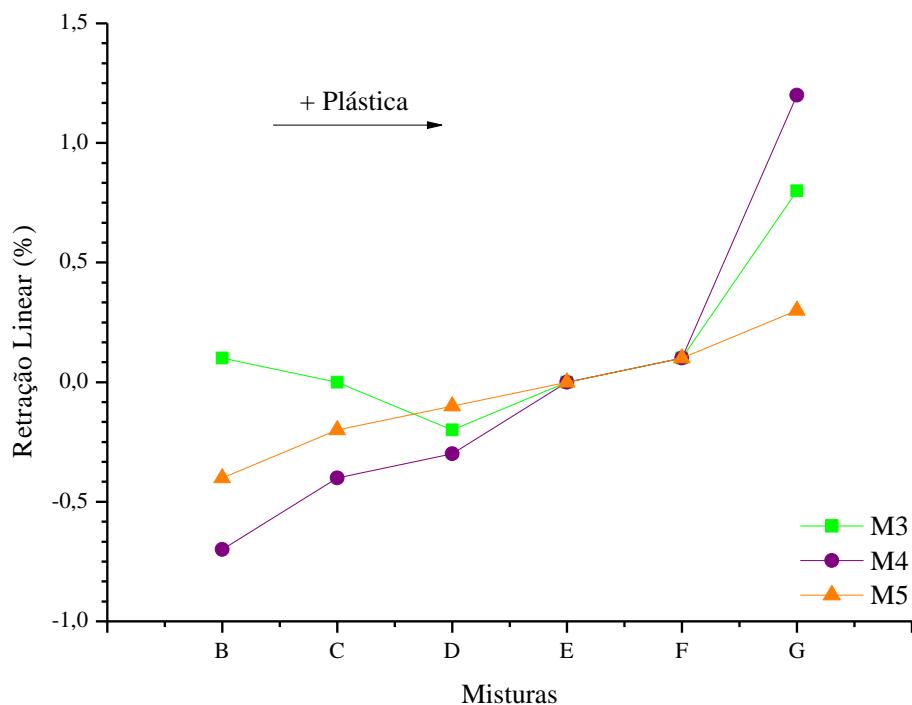


Figura 4.22. Comparação RLq para as formulações M3, M4 e M5, para 950 °C.

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam os resultados da absorção de água das formulações em estudo com seus respectivos desvios padrões nas três temperaturas de queima.

Tabela 4.8. Absorção de água das formulações M1, M2 e M3.

Misturas	Formulações								
	M1			M2			M3		
	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C
B	13,9±0,2	14,0±0,2	10,3±0,2	11,6±0,1	12,0±0,2	10,6±0,2	13,5±0,5	13,0±0,4	10,0±0,4
C	13,4±0,2	13,3±0,2	12,8±0,2	11,8±0,2	11,6±0,2	10,4±0,3	12,7±0,5	12,7±0,5	9,8±0,2
D	12,4±0,4	12,3±0,2	11,3±0,2	11,2±0,2	11,0±0,3	9,4±0,3	12,2±0,2	12,0±0,3	10,1±0,3
E	12,3±0,2	11,8±0,1	10,5±0,2	11,3±0,3	11,1±0,1	9,2±0,1	11,8±0,3	11,8±0,3	9,8±0,3
F	12,0±0,1	11,9±0,1	10,1±0,1	11,2±0,2	10,8±0,2	8,7±0,3	11,9±0,1	11,5±0,4	9,7±0,1
G	11,9±0,1	11,1±0,1	8,4±0,3	12,5±0,0	12,5±0,3	11,5±0,3	11,9±0,1	11,1±0,1	8,4±0,3

Tabela 4.9 Absorção de água das formulações M4, e M5.

Misturas	Formulações					
	M4			M5		
	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C
B	13,5±0,3	13,0±0,2	12,8±0,2	12,2±0,2	11,8±0,2	11,2±0,5
C	12,9±0,2	12,4±0,1	11,8±0,1	11,8±0,1	11,6±0,2	10,1±0,0
D	11,8±0,2	11,8±0,3	10,7±0,1	12,2±0,1	11,7±0,3	10,3±0,3
E	11,5±0,2	11,4±0,4	9,8±0,2	12,2±0,2	12,0±0,2	10,5±0,2
F	10,4±0,5	9,4±0,2	6,7±0,7	12,8±0,2	12,5±0,2	10,8±0,2
G	11,1±0,2	10,1±0,2	7,5±0,3	12,8±0,1	12,4±0,3	10,3±0,6

De acordo com os resultados encontrados, observa-se que para todas as formulações, os valores da absorção de água são inferiores a 20 %, valor máximo admissível para esse tipo de produto de acordo com a ABNT, NBR 15310. Nota-se, de maneira geral, que a elevação de temperatura provocou uma diminuição da absorção de água, principalmente para as misturas onde a quantidade de matéria-prima plástica é maior.

A marcação do valor máximo da absorção de água recomendável para telha cerâmica tipo colonial, é de 11 %, em termos práticos aplicado às indústrias. Observa-se a partir desta marca que a queima dos produtos a 850 °C é inviável, visto que para todas as formulações os valores encontrados superam 11 %, exceto para a formulação M4-F.

Certifica a analogia entre os valores encontrados para absorção de água e a retração linear de queima correspondente das formulações. A menor absorção das formulações estudadas foi constatada na formulação M4, sinterizada a 1050 °C, seguida das formulações M2 e M3, também sinterizada a 1050 °C, comprovando a relação entre absorção de água e temperatura de queima, com valores inferiores a 9 %.

Na Figura 4.23 são mostradas as curvas de queima das formulações M2-D, M2-F, M3-G, M4-E, M4-F e M5-C.

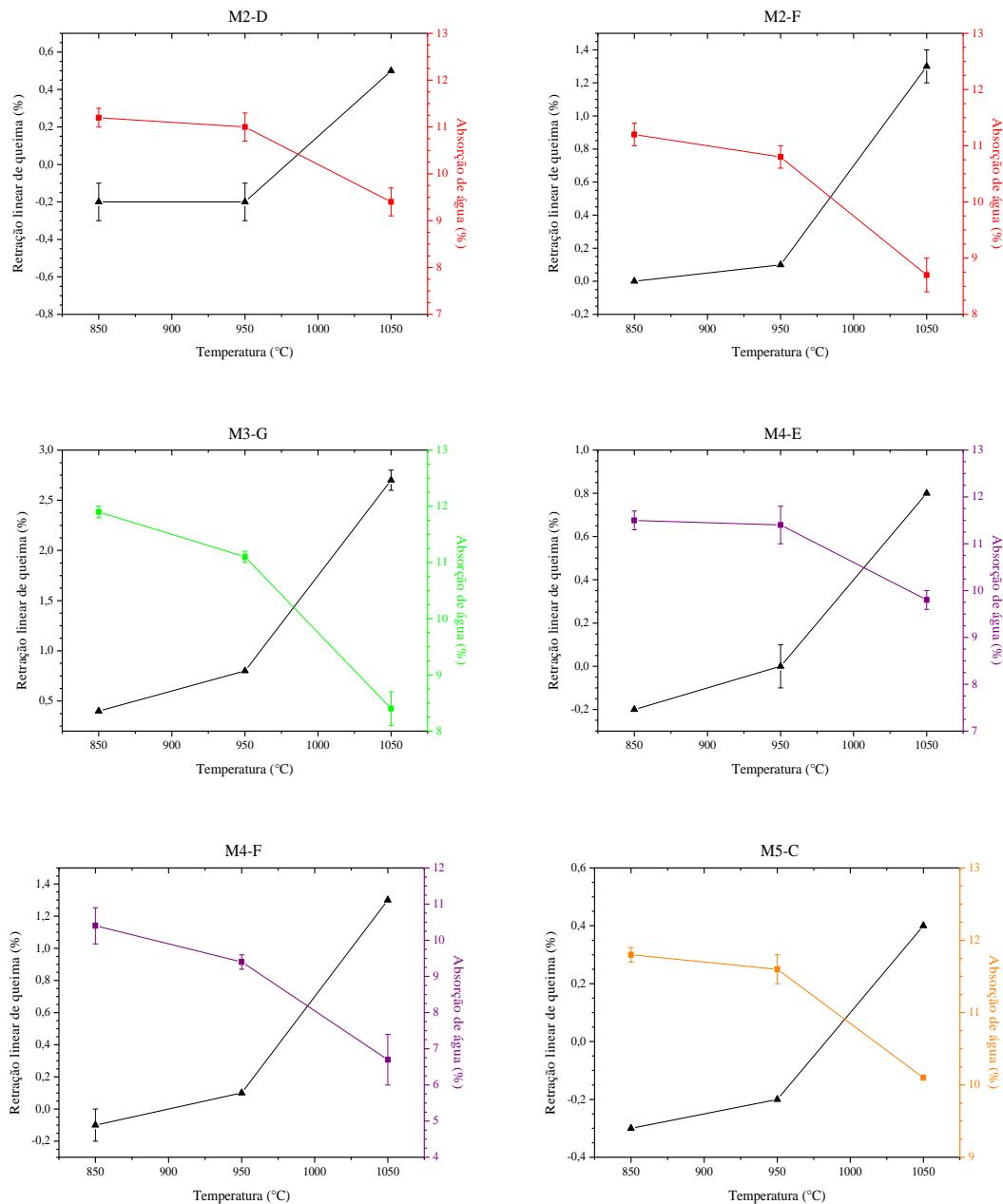


Figura 4.23. Curvas de gresificação das formulações M2-D, M2-F, M3-G, M4-E, M4-F e M5-C.

Para todas as formulações, com aumento da temperatura de queima, percebe-se uma diminuição na AA e aumento da RLq, como já discutido anteriormente. Para as formulações M2-D, M2-F e M3-G é sugerido uma temperatura de queima próxima a 980 °C, local onde as curvas se cruzam, já para as formulações M4-E, M4-F e M5-C a temperatura sugerida é um pouco mais alta, chegando a 1000 °C.

4.3.3. POROSIDADE APARENTE

A porosidade aparente do produto cerâmico mantém relação direta com a capacidade do mesmo em absorver água, comprovado pelo fato que estes resultados complementam os discutidos anteriormente de absorção de água.

As Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam os resultados da porosidade aparente das formulações estudadas nas temperaturas de queima.

Verifica-se para quase todas as formulações a conformidade entre a relação inversa entre a porosidade aparente e temperatura de queima. A única exceção é a formulação M2-B, onde a 850 °C verifica-se uma porosidade aparente de 25,3 % e a 950 °C esse valor aumenta para 26 %.

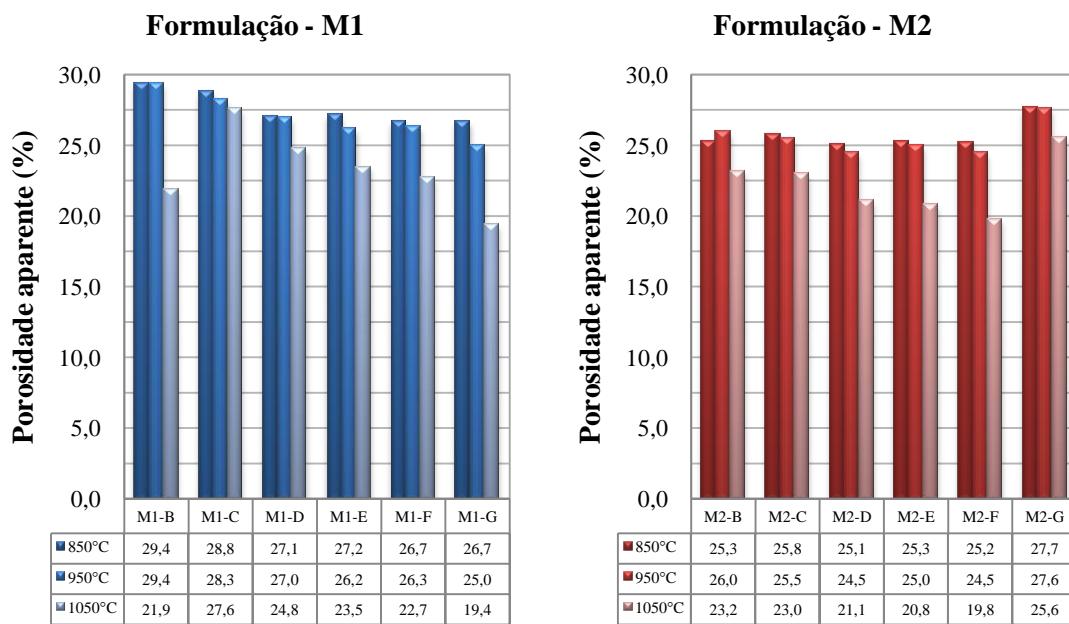


Figura 4.24. Comparação da variação da PA para as formulações M1 e M2.

De forma geral, a adição de matéria-prima plástica provocou uma diminuição na quantidade de poros, no entanto, na temperatura de 1050 °C para a formulação M1 a

adição de material plástico inicialmente provocou um aumento na porosidade do material que aumentou de 21,9 % para 27,6 %. A formulação M2 obteve reduções discretas na porosidade.

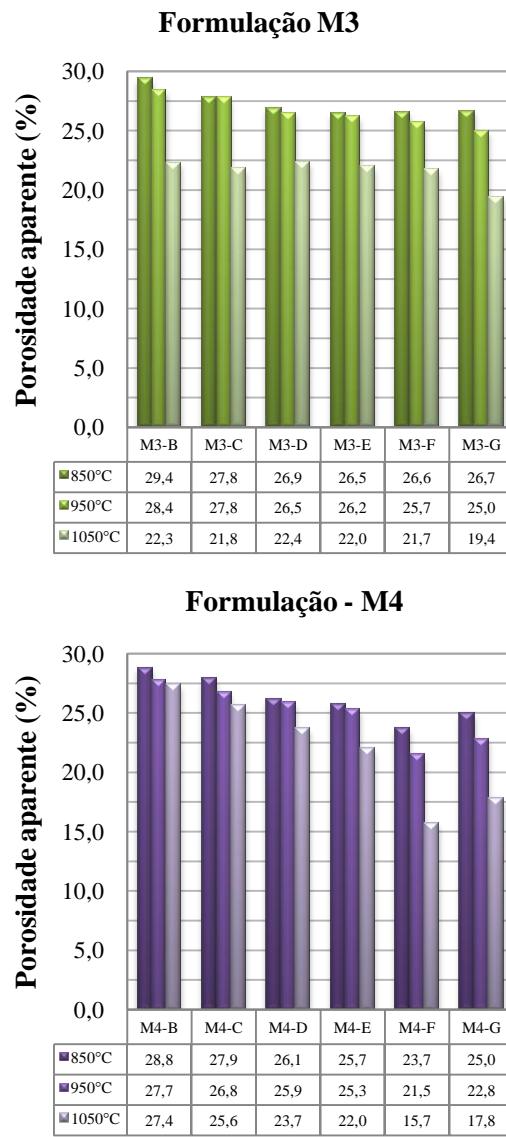


Figura 4.25. Comparação da variação da PA para as formulações M3 e M4.

Observa-se que a formulação M4, mistura F (25 % de A1 e 75 % A5) sinterizada a 1050 °C possui menor valor de porosidade aparente entre todas as amostras, com valor abaixo de 16 %. Em contrapartida o máximo valor de 29,4 % foi verificado nas formulações M1 e M3, mistura B sinterizadas a 850 °C. A porosidade nas cerâmicas é um fator prejudicial para o seu desempenho mecânico, todavia facilita o processo de secagem e evita o aparecimento de defeitos mais comprometedores consequente de gases formados durante a queima.

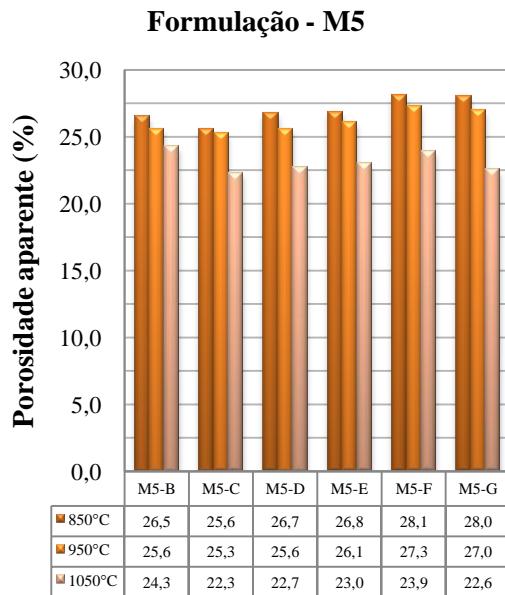


Figura 4.26. Variação da PA para a formulação M5.

4.3.4. MASSA ESPECÍFICA APARENTE

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os resultados da massa específica aparente para as formulações estudadas nas temperaturas de queima. Esta propriedade está associada aos resultados de absorção de água e porosidade aparente que foram apresentados anteriormente.

Conforme apresentado, as formulações M5 e M3 foram as que apresentaram menor variação da massa específica com relação à temperatura de queima e as misturas.

Tabela 4.10. Massa específica aparente das formulações M1, M2 e M3.

Misturas	Formulações								
	M1			M2			M3		
	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C
B	1,82	1,81	1,37	1,92	1,91	1,96	1,88	1,91	2,01
C	1,86	1,85	1,87	1,93	1,94	1,98	1,92	1,91	2,02
D	1,91	1,93	1,94	1,99	1,98	2,03	1,93	1,93	2,00
E	1,94	1,95	2,00	2,00	2,00	2,06	1,97	1,96	2,02
F	1,96	1,96	2,02	2,01	2,02	2,09	1,97	1,98	2,03
G	1,98	2,01	2,12	1,94	1,94	1,97	1,98	2,01	2,12

Tabela 4.11. Massa específica aparente das formulações M4 e M5.

Misturas	Formulações					
	M4			M5		
	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C
B	1,84	1,86	1,87	1,90	1,91	1,92
C	1,88	1,89	1,92	1,91	1,93	1,98
D	1,95	1,94	1,98	1,93	1,94	1,98
E	1,97	1,97	2,03	1,92	1,92	1,97
F	2,04	2,07	2,19	1,92	1,91	1,97
G	2,01	2,04	2,16	1,91	1,91	1,97

A formulação M1-B apresentou peculiar característica em relação à temperatura, observa-se que a 850 °C, a massa específica aparente é maior que a 1050 °C. Diferentemente do que ocorrem as todas outras formulações que ao elevar a temperatura de queima, provoca-se um aumento nos valores de massa específica aparente.

Observam-se valores máximos de massa específica aparente para a formulação M4, com valores de 2,19 e 2,16 g/cm³ para as misturas F (25 % de A1 e 75 % de A5) e G (100 % A5), respectivamente.

A Figura 4.27 apresenta algumas amostras após o processo de queima. A coloração pós-queima das formulações parte de um vermelho “apagado” para tonalidades de vermelho mais “vivo” à medida que aumenta a temperatura de queima, confirmando o elevado teor de Fe₂O₃ presente nas argilas. Uma importante propriedade verificada é a ausência da variação de tonalidade da maioria das amostras, importante para o tipo de produto o qual a formulação é designada. Alguns defeitos foram evidenciados, como manchas escuras decorrente do processo de má sinterização, caso verificado para a amostra M5-E queimada a 850°C; e no caso das amostras M4-D e M2-E manchas centrais, cuja principal causa é a carência de oxigênio na parte interior da peça produzido pela redução do óxido de ferro (DUTRA, 2008).

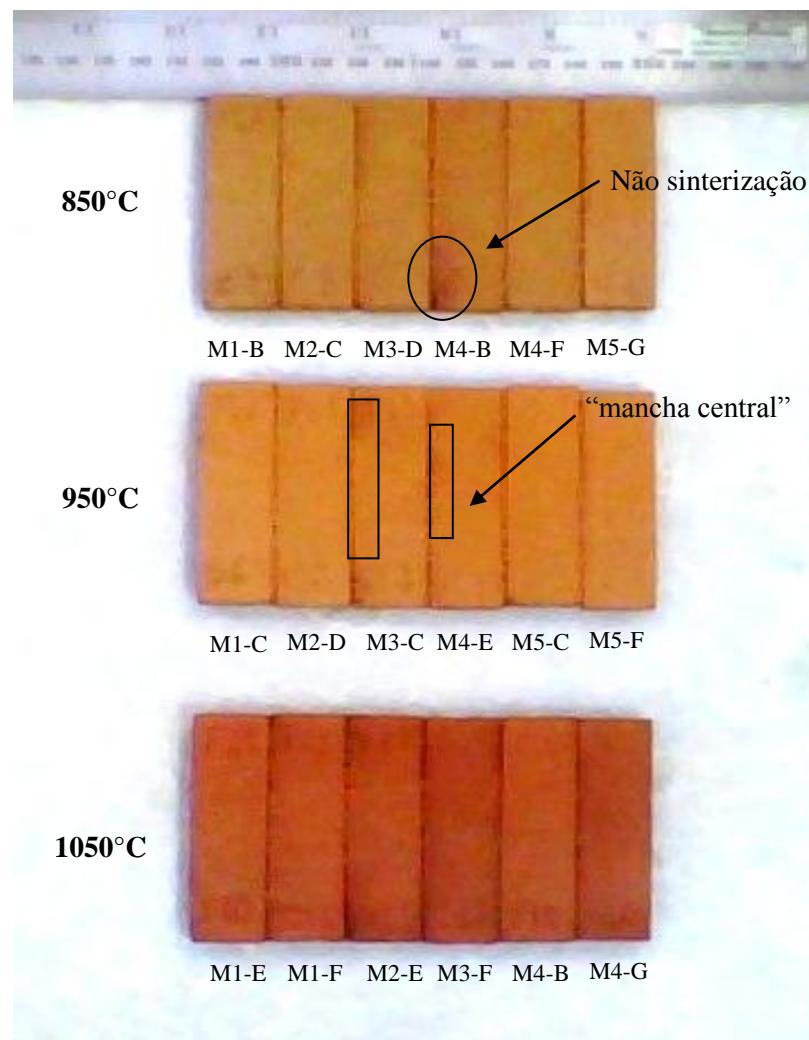


Figura 4.27. Fotografia dos corpos-de-prova siterizados a 850, 950 e 1050°C.

A rápida formação de fases e a quantidade elevada de matéria orgânica levaram a rápida liberação de gases originados das reações de decomposição do material, aprisionando gases, levando a formação de bolhas na superfície do material, como mostrado na Figura 4.28.

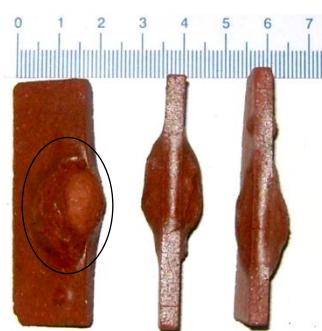


Figura 4.28. Fotografia dos corpos-de-prova M4-G (100% A5) siterizados a 1050°C sob taxa de aquecimento de 10°C/min.

4.3.5. CARGA DE RUPTURA

Nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 é apresentado o a carga de ruptura sob flexão em três pontos das formulações em função das temperaturas de sinterização e do percentual de material plástico presente na massa. O acréscimo nos valores da carga de ruptura ocorre-se com a elevação da temperatura de queima, fato explicado pela maior densificação da massa, o que leva a diminuição da porosidade aparente dos mesmos.

Comparando os resultados encontrados nas formulações com os resultados de porosidade aparente, verifica-se que o aumento na temperatura de sinterização para a formulação M1, provocou uma diminuição nos valores de porosidade aparente de 26,7 % para 22,7 %, (mistura M1-F, siterizada a 850°C e 1050°C, respectivamente). No entanto, para valores de resistência mecânica, ocorreu uma diminuição de valor, variando de 2,64 kgf para 2,44kgf. Porém, observou-se de forma geral que, à medida que foi elevada a temperatura de queima, ocorreu um aumento nos valores de resistência dentro da mesma mistura.

Quanto ao efeito da adição das matérias-primas plásticas para as formulações M1, M4 e M5, fixando as temperaturas, observam-se um aumento nos valores de resistência mecânica.

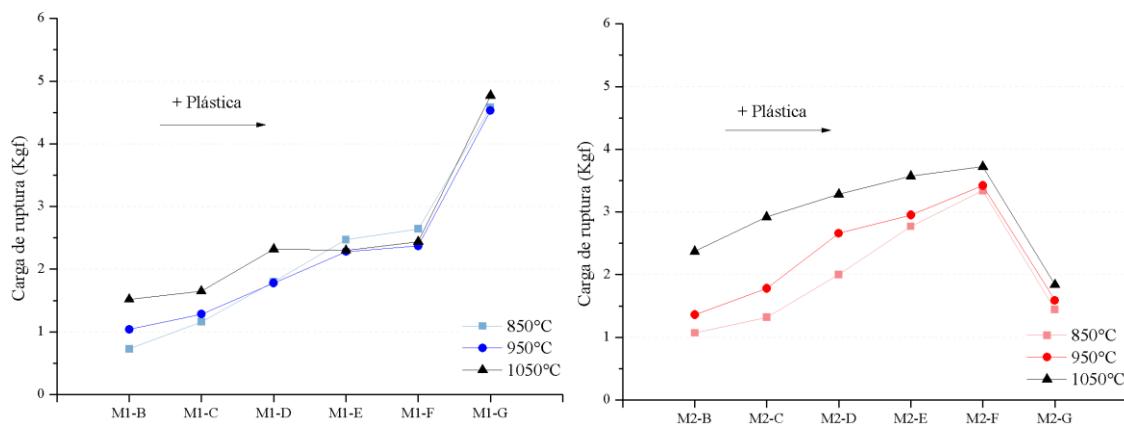


Figura 4.29. Comparação da variação da CR para as formulações M1 e M2.

A formulação M3 apresenta comportamento semelhante às demais, quando se adiciona matéria-prima plástica, ocorre um aumento nos valores de resistência, havendo uma concordância quando comparado aos valores de massa específica aparente, expostos anteriormente.

A mistura M2-G apresenta comportamento singular, quando comparadas às misturas M1-G e M4-G, visto que, para essas formulações a mistura G (100% de material plástico), corresponde aos maiores valores encontrados para resistência mecânica.

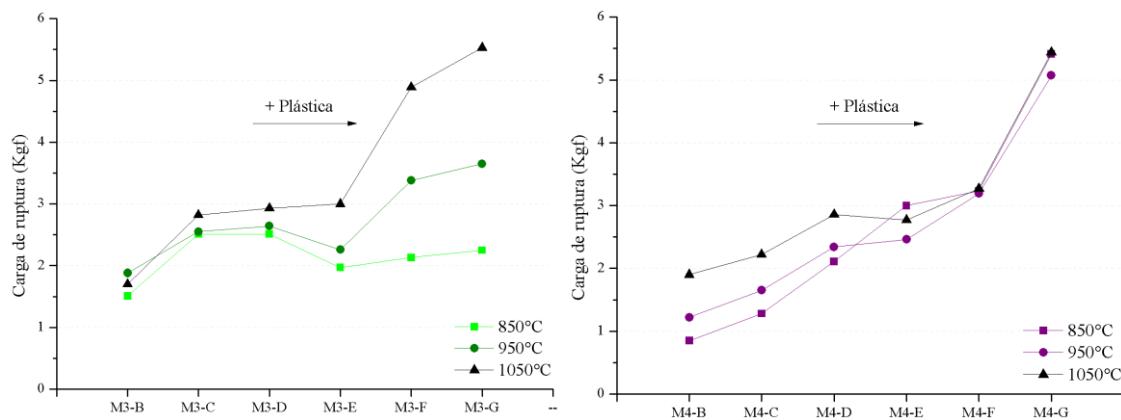


Figura 4.30. Comparação da variação da CR para as formulações M3 e M4.

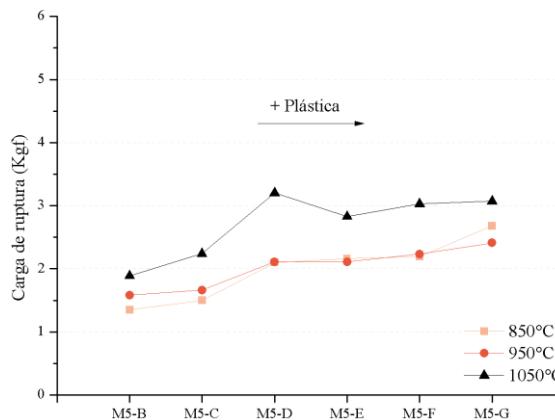


Figura 4.31. Variação da CR para a formulação M5.

A mistura M4-G, sinterizada a 1050 °C apresentou maior carga de ruptura, suportando uma força de 5,44 kgf, comprovando resultados supracitados de absorção de água e massa específica aparente. Em contraponto, a mistura M4-B, sinterizada a 850 °C teve uma carga de ruptura de apenas 0,85 kgf.

A formulação M5 obteve valores de carga de ruptura mais uniformes, sem grandes variações, assim como para os resultados anteriormente expostos. Foi observado, por exemplo, para a mistura M5-B sinterizada a 850 °C uma carga de ruptura de 1.35 kfg, no outro extremo temos a formulação M5-G sinterizada a 1050 °C com um valor de cerca de 3 kgf.

4.3.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A Figura 4.32 corresponde às micrografias, referentes às amostras M1-D, M1-E e M1-F, sinterizadas a 950 °C, sob taxa de aquecimento de 10 °C/min. Os resultados mostram que a microestrutura desenvolvida nesta temperatura caracteriza-se por uma matriz bem sinterizada, e sem nenhuma evidência de excessiva formação de fase líquida. A fração de grãos mais grosseiros, provavelmente constituída de quartzo, apresenta-se bem envolvida pela fase matriz, mostrando pouco ou nenhum descolamento na interface entre as duas fases. Esta característica microestrutural é coerente com os resultados de propriedades mecânicas apresentados por estas formulações.

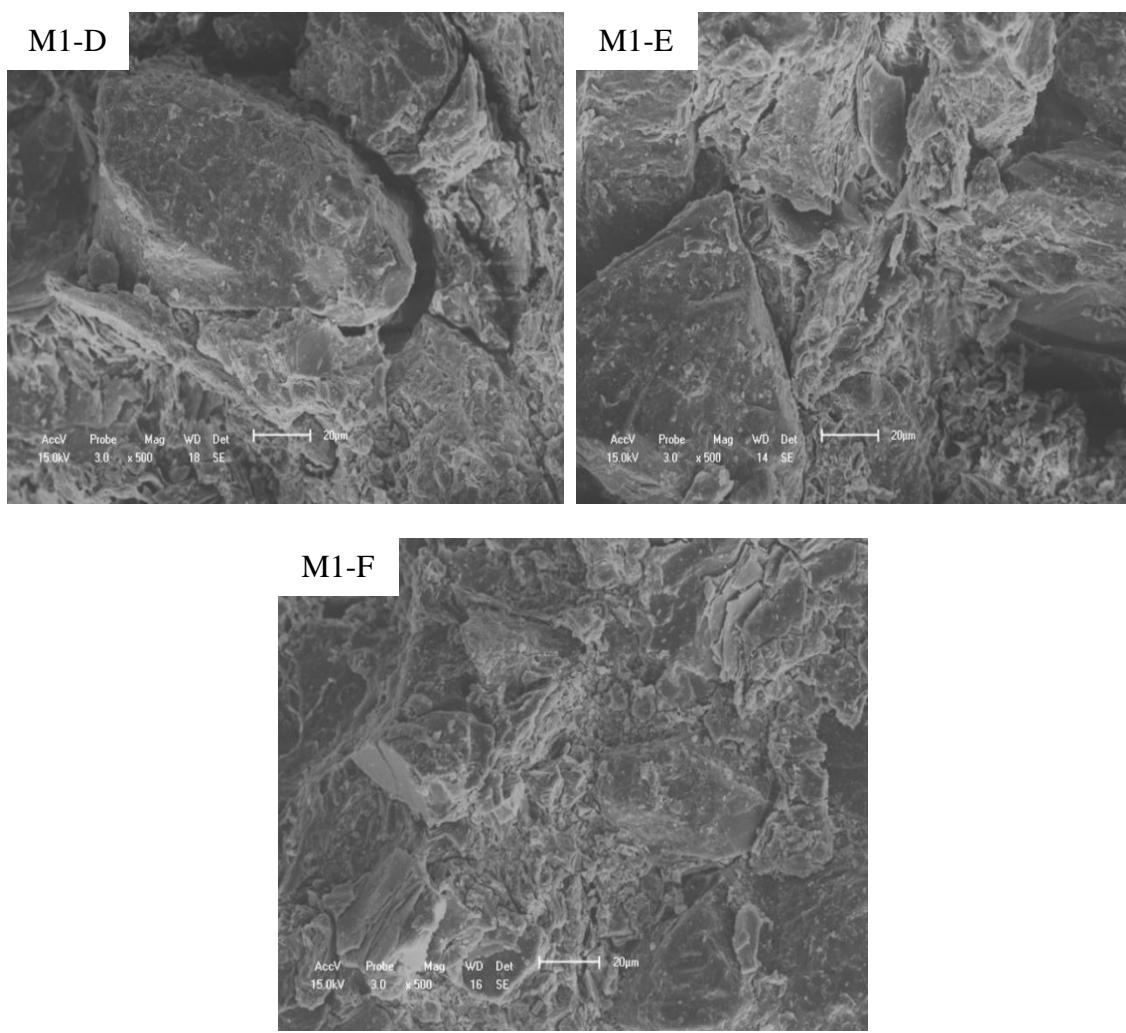


Figura 4.32. Micrografias obtidas por MEV das amostras M1-D, M1-E e M1-F, sinterizada a 950 °C, com 500x de ampliação.

A Figura 4.33 apresenta a micrografia da amostra M1-C, onde fica evidente a presença de partículas de quartzo na amostra. Essa observação é justificada pelo aspecto da superfície de fratura, onde se verifica planos de clivagem característicos da fratura frágil desse material.

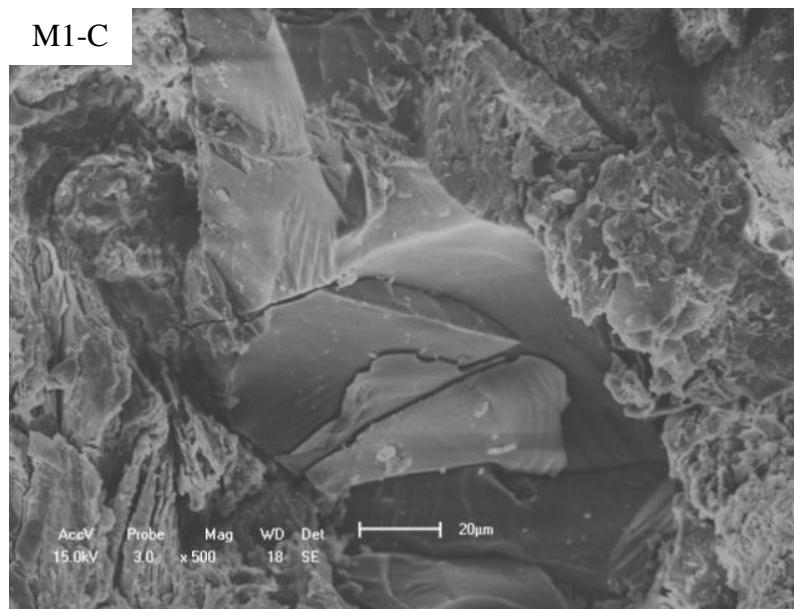


Figura 4.33. Micrografias obtidas por MEV da amostra M1-C, sinterizada a 950 °C, com 500x de ampliação.

O estudo do efeito da temperatura de sinterização foi realizado com amostras da formulação M4-F. Os resultados mostram uma evolução do processo de densificação associado à modificação da fase matriz. Deste modo, à 850 °C observa-se uma microestrutura formada por grãos finos associados a fase matriz, sem evidências de formação de fase líquida. A 950 °C evidencia-se o início do processo de formação de fase líquida, verificado pela mudança drástica do aspecto da fase matriz, mas sem alteração perceptível da estrutura de grãos grosseiros. A 1050 °C verifica-se a formação extensiva de fase líquida associadas às fases matriz e estrutura de grãos grosseiros.

A Figura 4.34 apresenta as micrografias das misturas M4-F sinterizadas a 850, 950 e 1050 °C respectivamente.

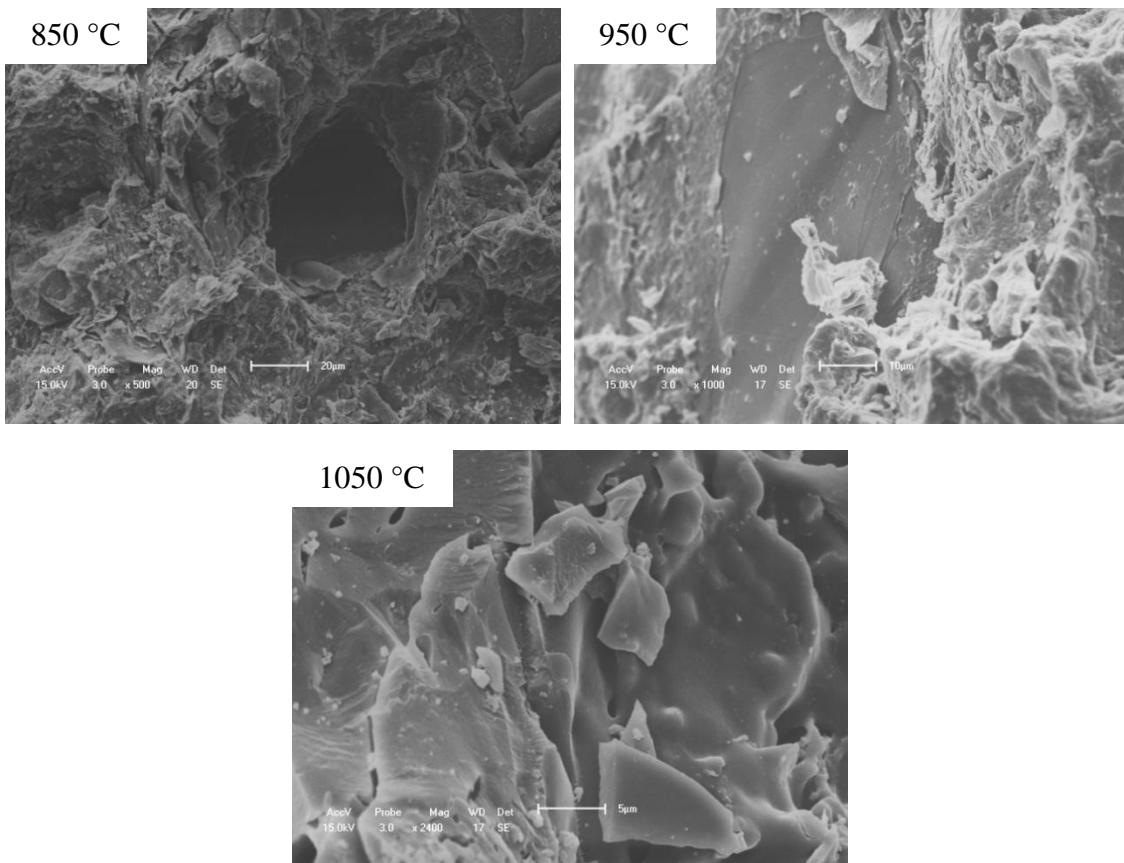


Figura 4.34. Micrografias obtidas por MEV das amostras M4-F, sinterizada a 850, 950 e 1050 °C, com ampliação de 500x, 1000x e 2400x, respectivamente.

Verifica-se na Figura 4.34 a diminuição do número de poros existente nas amostras, comprovando a queda nos valores de absorção de água apresentados na Tabela 4.9 supracitada. A evolução na temperatura de sinterização leva a uma maior formação de fase vítreia (líquida) no material.

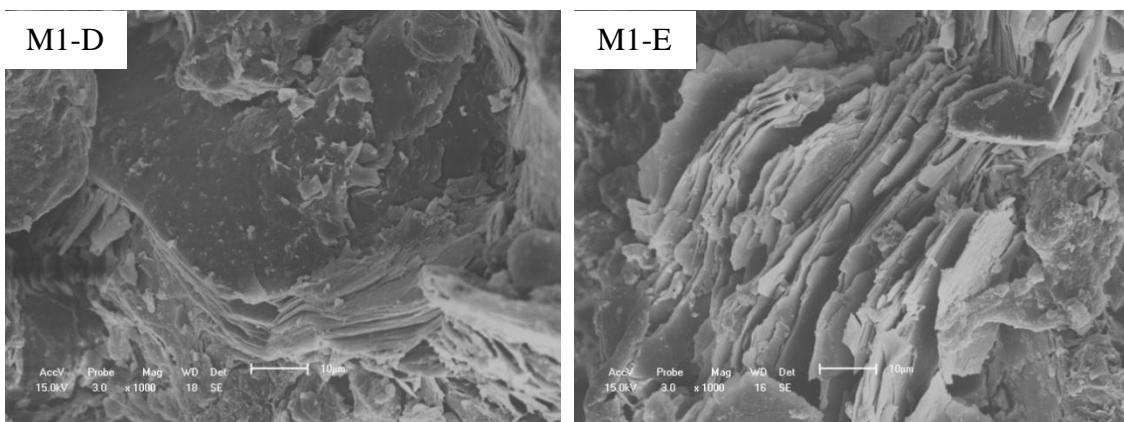


Figura 4.35. Micrografias obtidas por MEV das amostras M1-D e M1-E, sinterizada a 950 °C, com 1000x de ampliação.

A estrutura apresentada na Figura 4.35 é típica da mica muscovita, fase essa caracterizada por sua alta capacidade de formar fase líquida a altas temperaturas. Esta, esteve presente em todas as amostras que continham em sua formulação a matéria-prima A2, como verificado para os corpos-de-prova da formulação M1.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

- As matérias-primas analisadas possuem potencial de aplicação na indústria de cerâmica vermelha, sendo aconselhado o uso em formulações contento material plástico e não-plástico;
- As argilas caracterizadas apresentam características químicas semelhantes especialmente às amostras A2 e A5.
- As matérias-primas A1, A3 e A6 não desenvolvem plasticidade suficiente para o processo de conformação, o que limita sua aplicação para fabricação de telha cerâmica, sendo necessária a adição de um material mais plástico;
- A temperatura de queima influencia diretamente na coloração e nas propriedades tecnológicas dos corpos-de-prova formulados, essa afirmação é comprovada pelas micrografias obtidas para a massa M4-F sinterizada, nas três temperaturas de queima.
- Com base nos resultados expostos anteriormente, pode-se constatar que os valores sugeridos pela norma NBR 15310: Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos, e métodos de ensaio, foram superados para as várias formulações propostas nesta dissertação;
- Analisando a absorção de água das amostras verifica-se que a maioria das formulações só atinge valores de AA abaixo de 11 % quando sinterizadas a temperaturas mais elevadas. A formulação M4-F apresentou melhores propriedades nas três temperaturas de queima;
- Quanto a variação da resistência mecânica, a formulação M4 obteve dois resultados extremos: M4-G sinterizada a 1050 °C, com 5,44 kgf de carga de ruptura; e M4-B sinterizada a 850 °C com 0,85 kgf, comprovando a influencia da adição de material plástico e da temperatura a formulação.
- Formulações com elevado teor de óxido de ferro e matéria orgânica favorecem ao aparecimento de defeitos, logo se aconselha a adição de argilas menos plásticas ou utilizar taxa de aquecimento inicial baixa, caso verificado na formulação M4, onde a

adição da matéria-prima A5 favorece a formação de bolhas nas amostras, devido seu elevado teor de matéria orgânica;

- Não foi constatada uma formulação ideal para ser utilizada como padrão de qualidade, pois variáveis de processamento como, taxa de aquecimento mais elevadas, maiores pressões de compactação, maior temperatura de patamar de queima, pode influenciar diretamente nas propriedades finais;
- O uso de formulações é fundamental para determinar a proporção ideal entre as matérias-primas utilizadas para obtenção das melhores propriedades, de forma que é notório que algumas indústrias da região não utilizam as melhores formulações possíveis.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar testes em escala piloto nas indústrias da região Seridoense;
- Verificar a influencia de outras variáveis de processamento, como pressão de compactação, teor de umidade, diferentes ciclos de queima nas propriedades finais das massas cerâmicas estudadas;
- Investigar o efeito da granulometria e da composição granulométrica a fim de obter massas cerâmicas de queima rápida;
- Combinar formulações utilizando mais de duas matérias-primas, verificando assim mudanças nas propriedades finais das massas;
- Estudar a adição de resíduos industriais na massa cerâmica a fim de minimizar impactos ambientais decorrentes de descartes desordenados dos mesmos.

REFERÊNCIAS

- ALPER, A. M. Phase diagrams in advanced Ceramics. Academics Press, Inc. 1995.
- Associação Brasileira de Cerâmica (2004). Disponível em: http://www.abceram.org.br/asp/abc_281.asp. Acesso em: 08 de Junho 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. NBR 7172: Telha cerâmica tipo francesa – Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- _____. NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- _____. NBR 8947: Telha cerâmica – Determinação da massa e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.
- _____. NBR 9600: Telha cerâmica de capa e canal tipo colonial – Dimensões (Padronização). Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- _____. NBR 9601: Telha cerâmica de capa e canal – Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- _____. NBR 9602: Telha cerâmica – Determinação da carga de ruptura à flexão. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- _____. NBR 15310: Componentes cerâmicos – Telhas- Terminologia, requisitos, e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- BARBA, A.; FELIU, C. Materias-primas para la fabricación de soportes de balbosas cerámicas. 1 ed. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, 1997, 290p.
- BEZERRA, F. D. Perfil da indústria de cerâmica vermelha no nordeste. Anais do 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro-SP (2005). CD-ROM.
- BONFANTI (2008). Disponível em: <http://www.bonfanti.com.br/ceramica/catalogo.aspx?id=25>. Acesso em: 23 de Junho de 2008.

CARVALHO, O. O. Perfil da industria de cerâmica vermelha do Rio Grande do Norte. Natal-RN. SENAI, (2001). CD-ROM.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. An Introduction to the Rock-Forming Mineral, Logman Group Ltd, p.340-355, London, 1975.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 2 ed. USA: Paperback, 1992, 695p.

DUTRA, R. P. S. Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural. 2007, 138p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/PPgCEM, Natal-RN.

Instituto Euvaldo Lodi (2008). Disponível em:
http://www.rn.iel.org.br/index.php?option=com_content&task=view&id=17. Acesso: 09 de Junho de 2008.

LEITE, S. Q. M.; COLODETE, C. H. A.; DIEGUEZ, L. C. Extração de ferro de esmectita brasileira com emprego do método ditionito-citrato-bicarbonato. Química Nova, v.23, p.297, 2000.

LOLLI, L.; NASSETTI, G.; MARINO, L. F. B. A preparação a seco de massas cerâmicas. Cerâmica Industrial, v.5, p.23-27, 2000.

LOPES, J. L.; ACCHAR, W. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de blocos sinterizados à lenha e a gás natural. In: Congresso Brasileiro de Ciências e Engenharia de Materiais, Foz do Iguaçu, PR, 2006. Anais... p. 1556-1564.

MACEDO, R. M. P. R. Aplicação da metodologia de planejamento de experimentos para formulação de massas cerâmicas para telhas, 2007, 117p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/PPgCEM, Natal-RN.

MELCHIADES, F. G.; QUINTEIRO, E./ BOSCHI A. O. A curva de gresificação: parte 1. Cerâmica Industrial, v.4, p.30-31, 1996.

MORAIS, I. R. D. Seridó norte-rio-grandense: uma geografia da resistência. 2005, 158p. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/ PPgCS. Caicó-RN.

MORAES, M. L. V. N. Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulin na produção de porcelanato cerâmico. 2007, 153p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN/PPgCEM, Natal-RN.

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, p.28-29, 2001.

OLIVEIRA, A. P. N.; MONTEDO, O. R. K.; PIZETE, J. CASAGRANDE, M. Matérias-primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre as propriedades do produto final. Cerâmica Informação, n.10, p.57-65, 2000.

PAULETTI, M. C. Modelo para introdução de nova tecnologia em agrupamentos de micro e pequenas empresas: Estudo de caso das indústrias de cerâmica vermelha no vale do rio tijucas. 2001, 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis-SC.

PEÇANHA JR. L. A. F. Reformulação de massa cerâmica para telhas do município de campos dos goytacazes. 2006, 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Rio de Janeiro-RJ.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para cerâmica vermelha. Cerâmica Industrial, v.2, p.1-4, 1997.

PROJETO ESTUDOS REGIONAIS DO RIO GRANDE DO NORTE (2008). Disponível em: <http://br.geocities.com/estudosregionais/serido-geologia.htm>. Acesso em: 10 de Junho de 2008.

RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, A. A. L.; LABRINCHA, J. A. Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmica vermelha. Cerâmica Industrial, v. 8, p. 37-42, 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, p.1-4, 2004.
- SANCHEZ, L. M.; CAVA S. S.; PASKOCIMAS, C. A.; CERISUELO, E.; LONGO, E.; CARDÁ, J. B. Modelamento do processo de gresificação de massas cerâmicas de revestimento. *Cerâmica*, v.48, p.217-222, 2002.
- SOARES, J. M. D.; TOMAZETTI, R. R.; TAVARES, I. S.; PINHEIRO, R. B. Panorama sócio-econômico das indústrias de cerâmica vermelha da região central do Estado do Rio Grande do Sul. *Cerâmica Industrial*, v.9, p.39-46, 2004.
- SOUZA SANTOS, P. Ciência e Tecnologia de Argilas, São Paulo-SP: Editora Edgard Blocher Ltda. 1989.
- TUBINO, L. C. B.; BORBA, P. Etapas do processo cerâmico e sua influência no produto final – massa, extrusão, secagem e queima, SENAI-RS. 18. (Dossiê Técnico do Centro de Educação Profissional SENAI Nilo Bettanin), 2006.
- VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de bigot. *Cerâmica Industrial*, v.8, p.42-46, 2003.
- ZANDONADI, A. R. 1998. Fundamentos da tecnologia cerâmica: programa de treinamento para terceiros países, São Paulo: IPT/JICA. 112p. (Apostila de curso de treinamento em tecnologia cerâmica, inédito).
- ZANDONADI, A. R. 1996. Cerâmica Estrutural. In: Anuário Brasileiro de Cerâmica. São Paulo: ABC, 154p.