

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

Linha de pesquisa: DURABILIDADE DE MATERIAIS

**EFEITO DA AÇÃO DE CARBONATOS SOBRE A
EXPANSÃO POR UMIDADE ASSOCIADA ÀS
PROPRIEDADES CERÂMICAS DE BLOCOS
DESTINADOS À CONSTRUÇÃO CIVIL**

ROBERTO ALVARES DE ANDRADE

**Campina Grande/PB
maio/2009**

**EFEITO DA AÇÃO DE CARBONATOS SOBRE A
EXPANSÃO POR UMIDADE ASSOCIADA ÀS
PROPRIEDADES CERÂMICAS DE BLOCOS
DESTINADOS À CONSTRUÇÃO CIVIL**

Linha de pesquisa: DURABILIDADE DE MATERIAIS

Roberto Alvares de Andrade

**Tese apresentada ao programa de
Pós-Graduação do Centro de
Ciências e Tecnologia –CCT– da
Universidade Federal de Campina
Grande em cumprimento às
exigências para obtenção do grau
de DOUTOR EM ENGENHARIA
DE PROCESSOS.**

ORIENTADORES:

**Prof. Dr. HÉBER CARLOS FERREIRA
Prof. Dr. GELMIRE DE ARAÚJO NEVES**

**Campina Grande/PB
maio de 2009**

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A553e
2009

Andrade, Roberto Álvares de

Efeito da ação de carbonatos sobre a expansão por umidade associada às propriedades cerâmicas de blocos destinados à construção civil / Roberto Álvares de Andrade. — Campina Grande, 2009.
151f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

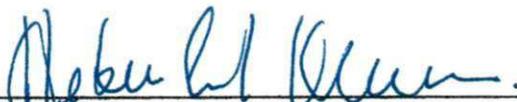
Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira e Prof. Dr. Gelmires Araújo Neves.

1. Expansão por Umidade 2. Propriedades Cerâmicas 3. Massas Argilosas 4. Cerâmica Vermelha 5. Adições I. Título.

CDU – 666.3-1(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE ROBERTO ALVARES DE ANDRADE, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE EM 28 DE MAIO DE 2009, E NESTA MESMA DATA APROVADA.



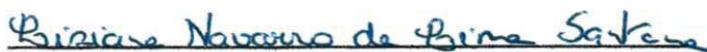
Prof. Dr. HEBER CARLOS FERREIRA

Orientador
UAEMa/UFCG



Prof. Dr. GELMIRES ARAÚJO NEVES

Orientador
UAEMa/UFCG



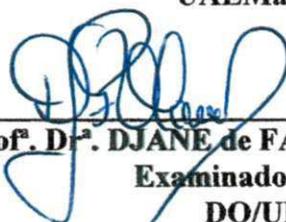
Prof. Dr.^a LIZIANE NAVARRO de L. SANTANA

Examinadora Interna
UAEMa/UFCG



Prof. Dr. HELIO de LUCENA LIRA

Examinador Interno
UAEMa/UFCG



Prof. Dr.^a DJANE de FÁTIMA OLIVEIRA

Examinadora Externa
DQ/UEPB



Prof. Dr. ROMUALDO RODRIGUES MENEZES

Examinador Externo
UAEP/UFCG



Prof. Dr. ARNALDO CARDIM de CARVALHO F^o

Examinador Externo
Departamento de Engenharia Civil/Universidade
de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Aos meus pais (in memoriam) Luiz e Eneida, o meu eterno relicário de gratas lembranças e dignificantes valores;

À minha esposa Leda Vilma e à minha filha Débora, as quais, resignadamente, abdicaram do pleno convívio familiar para a realização do sonho ora convertido neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores, Professores Dr. Héber Carlos Ferreira e Dr. Gelmires de Araújo Neves, pelos ensinamentos, paciência e estímulo que me possibilitaram acrescentar, ao pouco que sei, algo da concepção do projeto do Arquiteto Maior;

A Raimundo Gonçalves de Souza, pela competência e dedicação com que viabilizou a parte experimental deste trabalho;

Aos professores do Doutorado em Engenharia de Processos da UFCG, pelos ensinamentos e incentivo que tanto contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao Professor Doutor Marcelo Grilo, pelo estímulo e pelo empenho na cessão de equipamento específico do Departamento de Engenharia Mecânica;

A Tânia e Jozilene de Souza, colegas cuja convivência ao longo do doutorado transformou-as em caríssimas amigas, pelo incentivo e pelo apoio na manipulação e interpretação de dados da informática;

A Romualdo Menezes, pelos ensinamentos através dos quais foram dirimidas dúvidas que, persistentes, inviabilizariam este trabalho;

A Héber Júnior, pelo empenho no nosso treinamento voltado à manipulação de aparatos laboratoriais específicos, e na obtenção de materiais de difícil acesso necessários a esta pesquisa;

A Lizandra Araújo Campos pelas suas inúmeras horas voltadas às sugestões que em muito contribuíram para a definição do plano de atividades básicas desta pesquisa;

Aos companheiros de estudo Rozinaldo Rios, Raílda Schelcia, Valério Carlos, Sérgio Montini e Bartolomeu Jorge, cujos estímulo e convivência em muito atenuaram a aspereza desta caminhada;

Aos laboratoristas Ananias, Fernandes e Marcos (in memoriam), pela presteza com que possibilitaram o nosso irrestrito acesso aos equipamentos necessários às atividades experimentais;

À ATECEL – Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior – , pelo apoio na obtenção de dados inerentes a este trabalho;

À Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco –POLI– e ao CEFET-PE (atual Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco), pela liberação plena das nossas atividades acadêmicas ao longo do período correspondente às atividades práticas voltadas à viabilização desta tese;

À Universidade Católica de Pernambuco –UNICAP–, pelo estímulo e pelo ajuste freqüente dos horários das nossas atividades nela desenvolvidas, tornando-os compatíveis com os compromissos que, na UFCG, foram direcionados à viabilização desta tese;

Às Cerâmica Jardim (PB) e Camaragibe (PE), pela disponibilização das suas instalações e pela cessão das amostras das massas argilosas e dos seus produtos acabados utilizados neste trabalho.

RESUMO

A partir dos últimos trinta anos, a difusão da alvenaria estrutural com o emprego de blocos cerâmicos passou a exigir destes últimos a capacidade de absorver esforços mecânicos provenientes do peso próprio das edificações e das sobrecargas a elas transmitidas. As pesquisas para a viabilização desta nova função dos blocos cerâmicos não foram, até o presente momento, tão intensas a ponto de garantirem de forma efetiva o seu bom desempenho estrutural, e alguns problemas relacionados com as suas propriedades mecânicas e expansão por umidade (EPU) passaram a evidenciar a necessidade do aprimoramento das suas características. Foi com tal propósito que nesta tese se desenvolveram algumas investigações voltadas à detecção de novos parâmetros que aumentassem o acervo de conhecimento da EPU e das propriedades mecânicas dos blocos cerâmicos e, em tal direcionamento, partiu-se de informações da literatura técnica relativas ao efeito benéfico dos óxidos de cálcio e de magnésio incorporados às massas tomadas como matérias-primas dos blocos cerâmicos. Os resultados obtidos com corpos-de-prova autoclavados permitiram o confronto das suas características atuais com aquelas projetadas para o término da sua vida útil. Estudos para constatar eventuais minimizações da EPU e controle da resistência mecânica de corpos cerâmicos de vedação foram desenvolvidos com o emprego das massas das Cerâmicas ditas “A” e “B”, as quais foram manipuladas de forma idêntica. Os teores diferenciados da incorporação feita a cada uma das citadas massas dos carbonatos empregados, a saber, os carbonatos de cálcio e de magnésio, foram calculados com o propósito de gerarem idênticos teores de óxidos após o desprendimento do dióxido de carbono ao longo do ciclo da queima. Os resultados obtidos evidenciaram, para os blocos obtidos ao longo de ciclo de queima entre 850-1000°C, uma redução universal da EPU decorrente da ação do carbonato de cálcio, e uma discreta tendência da sua redução decorrente da adição do carbonato de magnésio; tais reduções de EPU se deveram à formação de fascas cristalinas desencadeadas pela ação dos referidos carbonatos. O maior valor de perda de massa, o surgimento da brucita, e os elevados valores de absorção de água decorrentes das adições magnesianas justificaram as menores reduções, ou ausência de reduções, de EPUs delas decorrentes. Quando as duas citadas massas foram manipuladas sem adições, aquela com maior teor de argila apresentou valores mais elevados de EPU, o que se explica, já que a maior quantidade de argila forma maior quantidade de fase vítrea. As adições utilizadas intervieram não só na EPU como também nas propriedades cerâmicas dos corpos-de-prova analisados. As adições calcárias e magnesianas, de forma quase absoluta, tenderem ao aumento das absorções de água, e, quanto à interferência no aumento da resistência mecânica, marcante foi a grande suscetibilidade ao teor “médio” (16,3%) de adição magnesiana associado à temperatura de queima de 1000°C, situação em que a tensão de ruptura à flexão, tanto para a Cerâmica “A” quanto para a Cerâmica “B”, apresentou valores desproporcionalmente superiores àqueles relativos a temperaturas de queima inferiores a 1000°C, fato provavelmente devido à efetiva presença da enstatita e da ringwoodita a esta temperatura de queima.

Palavras-chave: expansão por umidade; propriedades cerâmicas; massas argilosas; cerâmica vermelha; adições.

ABSTRACT

The use of ceramic blocks in structural masonry since the last thirty years has demanded their capacity of absorbing mechanic efforts resulting from the own weight of building and respective overloads. Researches intended to make possible the new performance of ceramic blocks have not been intensive enough to definitively assure a good structural performance, and some problems concerning their mechanic properties and moisture expansion have shown the need of deeply improve their characteristics. Aiming at that purpose, this doctoral thesis has developed some investigations to identify new patterns that may contribute to increase the knowledge of moisture expansion and mechanic properties of ceramic blocks. To achieve that purpose, we started from information provided by technical literature concerning the good effects of calcium oxide and magnesium oxide incorporated to the raw-materials of ceramic blocks. Results obtained from the autoclaved specimens have shown the differences between their present characteristics and those expected to be at the end of their working life. Researches to confirm possible moisture expansion minimizations and control of mechanic resistance of packing ceramic bodies have been carried out by using ceramic masses called "A" and "B", handled alike. Different contents of the carbonate used, such as calcium and magnesium carbonates, have been estimated, with the purpose of providing the same oxide contents after the carbon dioxide exit, along the firing cycle. Blocks obtained during a firing cycle between 850-1000°C show a universal moisture expansion decrease resulting from the action of calcium carbonate and a strong trend of its decrease resulting from the addition of magnesium carbonate. Such moisture expansion decreases resulted from the crystalline stages developed by the activity of those carbonates. The highest rate of mass loss, occurrence of brucite and high rates of water absorption resulting from the addition of magnesium carbonate justify shorter decreases or even non-reduction or moisture expansion resulting therefrom. When both masses were handled without additions, the one with higher rate of clay showed higher moisture expansion values, since a higher rate of clay responsible for higher quantity of vitreous phases. Added material interfered both in moisture expansion and in the ceramic properties of observed specimens. Remarkable was the high susceptibility of the medium content (16.3%) of magnesium carbonate addition interfering in the increase of mechanic resistance, joined to the firing temperature at 1000°C, and according to this tendency, rupture tension, in both Ceramics "A" and "B", showed disproportionably higher figures relative to firing temperatures under 1000°C. This fact is probably due to the effective presence of enstatite and ringwoodite at this firing temperature.

Keywords: moisture expansion; ceramic properties; clay-masses; heavy clay ceramic; additions.

PUBLICAÇÕES SOBRE O TEMA DA TESE

- Efeito do carbonato de cálcio sobre a EPU, a absorção de água e a porosidade aparentes de blocos confeccionados com o emprego da cerâmica vermelha – Anais do 18º Congresso brasileiro de engenharia e ciências dos materiais – CBECIMAT – Porto de Galinhas – PE – 2008.

- Influência do teor de quartzo na EPU e no comportamento mecânico das massas cerâmicas para uso em blocos furados – Anais do 18º Congresso brasileiro de engenharia e ciências dos materiais – CBECIMAT – Porto de Galinhas – PE – 2008.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 Considerações preliminares.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificativa.....	3
CAPÍTULO 2 Fundamentação teórica.....	6
2.1 Conceitos gerais relativos aos materiais cerâmicos.....	6
2.2 Estrutura mineralógica da matéria-prima da cerâmica tradicional.....	8
2.3 Entendimento do conceito de cerâmica vermelha.....	10
2.4 Processo de fabricação da cerâmica vermelha destinada à confecção de blocos.....	12
2.5 Realidade atual do processo produtivo da cerâmica vermelha no Nordeste.....	18
2.6 EPU dos produtos cerâmicos.....	19
2.6.1 Conceitos fundamentais para o entendimento da EPU.....	20
2.6.2 Influência da mineralogia das massas sobre a EPU.....	23
2.6.3 Influência da temperatura de queima sobre a EPU.....	32
2.6.4 Influência da porosidade, da absorção de água e da área específica sobre a EPU.....	37
2.6.5 Conceitos específicos da EPU.....	42
2.6.5.1 Análise e determinação da EPU “atual”.....	43
2.6.5.2 Análise e determinação da EPU “potencial” (ou EPU “total”).....	47
2.6.5.3 Análise e determinação da EPU “futura”.....	48

CAPÍTULO 3 Reflexões acerca do tema da tese.....	50
3.1 Cerâmica vermelha: incertezas inerentes à matéria-prima e/ou decorrentes do processo de fabricação.....	50
3.2 Considerações interpretativas relativas a alguns ensaios prescritos.....	52
3.3 A “EPU” ainda a caminho do entendimento pleno.....	58
CAPÍTULO 4 Materiais e métodos.....	61
4.1 Matérias-primas cruas: tipos, tratamento e prescrições.....	61
4.1.1 Massas e adições utilizadas.....	61
4.1.2 Remoção da umidade natural	62
4.1.3 Destorroamento	62
4.1.4 Peneiramento	62
4.1.5 Determinação da análise química	63
4.1.6 Determinação da análise granulométrica	63
4.1.7 Determinação da análise de plasticidade.....	64
4.1.8 Determinação da análise térmica diferencial (DTA).....	65
4.1.9 Determinação da análise térmica gravimétrica (TG).....	65
4.1.10 Determinação da análise difratométrica (DRx).....	65
4.2 Blocos cerâmicos: obtenção e prescrições.....	65
4.2.1 Moldagem	68
4.2.2 Secagem.....	68
4.2.3 Queima.....	68
4.2.4 Determinação do índice de absorção de água.....	69
4.2.5 Determinação da massa específica e da porosidade aparentes.....	69

4.2.6 Simulação de envelhecimento acelerado.....	69
4.2.7 Determinação da tensão de ruptura à flexão.....	70
4.2.8 Determinação da EPU.....	70
4.2.9 Determinação da análise térmica diferencial (DTA).....	70
4.2.10 Determinação da análise térmica gravimétrica (TG).....	71
4.2.11 Determinação da análise difratométrica (DRx).....	71
CAPÍTULO 5 Resultados e discussão.....	72
5.1 Matérias-primas cruas: caracterização e considerações interpretativas.....	72
5.1.1 Análise química das massas “A” e “B”.....	72
5.1.2 Análise granulométrica por difração a “laser” das massas “A” e “B”.....	74
5.1.3 Análise das propriedades plásticas das massas “A” e “B”.....	76
5.1.4 Análise dos difratogramas das massas “A” e “B” cruas, sem adições.....	76
5.1.5 Análise da DTA e da TG das massas “A” e “B” sem adições.....	78
5.1.6 Análise dos difratogramas das adições calcárias e magnesianas.....	80
5.1.7 Análise das TGs das adições calcárias e magnesianas.....	82
5.1.8 Configuração das massas “A” e “B” após a incorporação das adições calcárias e magnesianas.....	84
5.1.9 Análise dos difratogramas das massas “A” e “B” cruas após a incorporação das adições calcárias e magnesianas.....	85
5.1.10 Análise das DTAs e das TGs das massas “A” e “B” após a incorporação das adições calcárias.....	87
5.1.11 Análise das DTAs e das TGs das massas “A” e “B” após a incorporação das adições magnesianas.....	92
5.2 Blocos cerâmicos: parâmetros de caracterização e considerações interpretativas.....	98
5.2.1 EPU e propriedades cerâmicas dos corpos-de-prova moldados a diferentes temperaturas de queima e analisados à luz das especificações.....	98
5.2.2 Influência recíproca entre a EPU e os demais parâmetros pesquisados.....	105

5.2.2.1 Correlação entre a EPU e as características mineralógicas das massas “A” e “B” associadas às temperaturas de queima.....	105
5.2.2.2 Correlação entre a EPU dos blocos autoclavados obtidos a diferentes temperaturas e os tipos das adições utilizadas.....	107
5.2.2.3 Correlação entre a EPU e os resultados difratométricos dos blocos autoclavados obtidos a 1000°C.....	109
5.2.2.4 Correlação entre a EPU e as TGs dos blocos autoclavados obtidos a 1000°C.....	116
5.2.2.5 Correlação entre a EPU e a absorção de água dos blocos autoclavados (com ênfase às alterações devidas às temperaturas de queima).....	120
5.2.2.6 Correlação entre a EPU e a absorção de água dos blocos autoclavados (com ênfase às alterações devidas à ação dos teores das adições)	123
5.2.2.7 Correlação, ao longo do ciclo da queima, entre a EPU e a resistência mecânica dos blocos autoclavados	128
5.2.2.8 Correlação entre a EPU e o efeito da autoclavagem sobre corpos-de-prova obtidos a diferentes temperaturas de queima.....	132
CAPÍTULO 6 Conclusões.....	136
6.1 Conclusões concernentes aos objetivos específicos.....	136
6.2 Conclusões concernentes ao objetivo geral.....	138
CAPÍTULO 7 Referências.....	140
CAPÍTULO 8 Sugestões para pesquisas futuras.....	147

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Resultados da EPU “atual” de amostras de revestimento cerâmico obtidos a diferentes temperaturas de queima.....	46
Tabela 4.1 Classificação das massas quanto ao índice de consistência (Caputo 1988)..	64
Tabela 5.1 Composição química das massas utilizadas desconsiderando a perda ao rubro.....	72
Tabela 5.2 Análise racional das massas das Cerâmicas “A” e “B”.....	72
Tabela 5.3 Amplitude de teores de óxidos componentes de vinte e quatro massas consideradas como matérias-primas de cerâmica vermelha (Souza Santos, 1992).....	73
Tabela. 5.4 Teores de areia e de silte das massas “A” e “B” segundo os critérios da NBR 7181 (1984).....	74
Tabela 5.5: Características plásticas das massas utilizadas.....	76
Tabela 5.6 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica “A” moldadas a diferentes teores de adições calcárias.....	100
Tabela 5.7 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras autoclavadas da Cerâmica “A” moldadas a diferentes teores de adições calcárias.....	100
Tabela 5.8 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica “B” moldadas a diferentes teores de adições calcárias.....	101
Tabela 5.9 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras autoclavadas da Cerâmica “B” moldadas a diferentes teores de adições calcárias.....	101
Tabela 5.10 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica “A” moldadas a diferentes teores de adições magnesianas.....	103
Tabela 5.11 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras autoclavadas da Cerâmica “A” moldadas a diferentes teores de adições magnesianas.....	103
Tabela 5.12 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica “B” moldadas a diferentes teores de adições magnesianas.....	104
Tabela 5.13 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras autoclavadas da Cerâmica “B” moldadas a diferentes teores de adições magnesianas.....	104

Tabela 5.14 Correlações alumina/silica (A/S), {(óxido de sódio + óxido de potássio) / (alumina) [(N+K)/A]} e {(óxido de sódio + óxido de potássio) / (dióxido de silício) [(N+K)/S]} das massas utilizadas.....105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Efeito da composição sobre a EPU de géis coprecipitados de sílica e alumina.....	24
Figura 2.2 Efeito da composição sobre a EPU de argilas comerciais (1).....	25
Figura 2.3 Efeito da composição sobre a EPU de argilas comerciais(2).....	25
Figura 2.4 Efeito da temperatura de queima sobre a EPU (após autoclavagem) de caulins com adições de álcalis.....	26
Figura 2.5 Efeito do tempo de queima a 1050°C sobre a EPU do caulim com e sem adição de álcalis.....	27
Figura 2.6 Variação da EPU de massas contendo diferentes teores de calcita em relação à variação da temperatura de queima.....	30
Figura 2.7 Efeito da adição de CaCO ₃ sobre a EPU.....	31
Figura 2.8 Efeito da adição do MgCO ₃ sobre a EPU.....	32
Figura 2.9 Relação entre a temperatura de queima e a EP após a autoclavagem por 96 h a 200°C.....	33
Figura 2.10 Efeito da temperatura de queima sobre a EPU (em autoclave) de argilas comerciais.....	34
Figura 2.11 Efeito da temperatura na EPU do corpo cerâmico.....	35
Figura 2.12 Área específica e EPU versus temperatura de queima.....	37
Figura 2.13 Relação entre a EPU (autoclave – 0,5 h e 344,5 kPa), área específica e temperatura de queima de uma cerâmica branca.....	37
Figura 2.14 Relação entre a EPU e a absorção de água após autoclavagem por 96 h a 200°C.....	39
Figura 2.15 Efeito da temperatura de queima sobre a EPU e absorção de água.....	40
Figura 2.16 Porosidade e EPU versus temperatura de queima	42
Figura 3.1 Áreas de distribuição granulométrica para produtos cerâmicos argilosos...54	
Figura 4.1 Fluxograma da metodologia adotada para a avaliação da EPU e das propriedades cerâmicas dos blocos moldadas em laboratório.....	67
Figura 5.1 Curva granulométrica da massa da Cerâmica “A” obtida através da difração a “laser”.....	75
Figura 5.2 Curva granulométrica da massa da Cerâmica “B” obtida através da difração a “laser”.....	75
Figura 5.3 DRX da massa “A” crua e sem adições.....	77
Figura 5.4 DRX da massa “B” crua e sem adições.....	78

Figura 5.5 DTA e TG da massa crua da Cerâmica “A” sem adições.....	79
Figura 5.6 DTA e TG da massa crua da Cerâmica “B” sem adições.....	80
Figura 5.7 DRX da adição calcária.....	81
Figura 5.8 DRX da adição magnesiana.....	82
Figura 5.9 Análise térmica gravimétrica do carbonato de cálcio empregado como adição.....	83
Figura 5.10 Análise térmica gravimétrica do hidroxicarbonato de magnésio empregado como adição.....	84
Figura 5.11 DRX da massa crua da Cerâmica “B” após a adição de 18,0% de carbonato de cálcio.....	86
Figura 5.12 DRX da massa crua da Cerâmica “B” após a adição de 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio.....	86
Figura 5.13 DTA da massa crua da Cerâmica “A” com 12,0% de carbonato de cálcio.....	88
Figura 5.14 TG da massa crua da Cerâmica “A” com 12,0% de carbonato de cálcio.....	88
Figura 5.15 DTA da massa crua da Cerâmica “A” com 18,0% de carbonato de cálcio.....	89
Figura 5.16 TG da massa crua da Cerâmica “A” com 18,0% de carbonato de cálcio.....	89
Figura 5.17 DTA da massa crua da Cerâmica “B” com 12,0% de carbonato de cálcio.....	90
Figura 5.18 TG da massa crua da Cerâmica “B” com 12,0% de carbonato de cálcio.....	90
Figura 5.19 DTA da massa crua da Cerâmica “B” com 18,0% de carbonato de cálcio.....	91
Figura 5.20 TG da massa crua da Cerâmica “B” com 18,0% de carbonato de cálcio.....	91
Figura 5.21 DTA da massa crua da Cerâmica “A” com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio.....	94
Figura 5.22 TG da massa crua da Cerâmica “A” com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio.....	94
Figura 5.23 DTA da massa crua da Cerâmica “A” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio.....	95
Figura 5.24 TG da massa crua da Cerâmica “A” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio.....	95

Figura 5.25 DTA da massa crua da Cerâmica “B” com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio.....	96
Figura 5.26 TG da massa crua da Cerâmica “B” com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio.....	96
Figura 5.27 DTA da massa crua da Cerâmica “B” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio.....	97
Figura 5.28 TG da massa crua da Cerâmica “B” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio	97
Figura 5.29 Temperatura de queima versus EPU dos blocos das Cerâmicas “A” e “B” moldados sem adições.....	107
Figura 5.30 EPU versus temperatura de queima das amostras autoclavadas da Cerâmica “A”.....	108
Figura 5.31 EPU versus temperatura de queima das amostras autoclavadas da Cerâmica “B”.....	109
Figura 5.32 DRX de blocos da Cerâmica “A” moldados sem adição, autoclavados e queimados a 1000°C.....	111
5.33 DRX de blocos da Cerâmica “B” moldados sem adição, autoclavados e queimados a 1000°C.....	111
Figura 5.34 DRX de blocos da Cerâmica “A” com 12,0% de carbonato de cálcio, autoclavados e queimada a 1000°.....	112
Figura 5.35 DRX de blocos da Cerâmica “A” com 18,0% de carbonato de cálcio, autoclavados e queimados a 1000°C.....	112
Figura 5.36 DRX de blocos da Cerâmica “A” com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavados e queimados a 1000°.....	114
Figura 5.37 DRX de blocos da Cerâmica “A” 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavados, e queimados a 1000°C.....	113
Figura 5.38 DRX de blocos da Cerâmica “B” com 12,0% de carbonato de cálcio, autoclavados e queimados a 1000°C.....	114
Figura 5.39 DRX de blocos da Cerâmica “B” com 18,0% de carbonato de cálcio, autoclavados e queimados a 1000°C.....	114
Figura 5.40 DRX de blocos da Cerâmica “B” com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavados e queimados a 1000°C.....	115
Figura 5.41 DRX de blocos da Cerâmica “B” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavados e queimados a 1000°C.....	115

Figura 5.42 TG da massa da Cerâmica “A” sem adições, autoclavada e queimada a 1000°C.....	116
Figura 5.43 TG da massa da Cerâmica “B” sem adições, autoclavada e queimada a 1000°C.....	117
Figura 5.44 TG da massa da Cerâmica “A” com 12,0% de carbonato de cálcio, autoclavada e queimada a 1000°C.....	117
Figura 5.45 TG da massa da Cerâmica “B” com 12,0% de carbonato de cálcio, autoclavada e queimada a 1000°C.....	118
Figura 5.46 TG da massa da Cerâmica “A” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavada e queimada a 1000°C	118
Figura 5.47 TG da massa da Cerâmica “B” com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavada e queimada a 1000°C.....	119
Figura 5.48 TG da massa da Cerâmica “B” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavada e queimada a 1000°C.....	119
Figura 5.49 EPU versus absorção de água dos blocos autoclavados da Cerâmica “A”.....	121
Figura 5.50 EPU versus absorção de água dos blocos autoclavados da Cerâmica “B”.....	122
Figura 5.51 Absorção de água versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “A” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições calcárias.....	126
Figura 5.52 Absorção de água versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “B” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições calcárias.....	127
Figura 5.53 Absorção de água versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “A” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições magnesianas.....	127
Figura 5.54 Absorção de água versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “B” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições magnesianas.....	128
Figura 5.55 Resistência à flexão versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “A” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições calcárias.....	130
Figura 5.56 Resistência à flexão versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “B” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições calcárias.....	130
Figura 5.57 Resistência à flexão versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “A” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições magnesianas...	131
Figura 5.58 Resistência à flexão versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “B” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições magnesianas...	131

Figura 5.59	Temperatura de queima versus EPU de amostras autoclavadas e não autoclavadas das Cerâmicas “A” e “B” com 12,0% de adição calcária.....	134
Figura 5.60	Temperatura de queima versus EPU de amostras autoclavadas e não autoclavadas das Cerâmicas “A” e “B” com 18,0% de adição calcária.....	134
Figura 5.61	Temperatura de queima versus EPU de amostras autoclavadas e não autoclavadas das Cerâmicas “A” e “B” com 16,3% de adição magnesiama.....	135
Figura 5.62	Temperatura de queima versus EPU de amostras autoclavadas e não autoclavadas das Cerâmicas “A” e “B” com 24,6% de adição magnesiana.....	135

CAPÍTULO I

Considerações preliminares

1.1 Introdução

Na engenharia de materiais são presentemente realizados estudos voltados ao controle da expansão por umidade (EPU), cujo efeito mais evidente é o aumento das dimensões dos materiais cerâmicos, e até mesmo o seu colapso, caso as tensões internas geradas pelo aumento descontrolado do seu volume exceda o limite da sua resistência mecânica.

Chega a ser surpreendente que a engenharia civil esteja ao largo dos possíveis e prováveis efeitos da EPU, já que nos últimos tempos o emprego de blocos cerâmicos de vedação em alvenaria estrutural se constitui em opção bastante difundida para a construção de edificações de pequeno e médio portes, e, neste sentido, tornou-se urgente a implantação de uma cultura que passe a considerar a interferência de tão marcante fenômeno expansivo na vida útil da cerâmica vermelha autoportante.

Vários estudos vêm comprovando que a EPU se constitui em um dos fatores que interferem no colapso prematuro de algumas edificações implantadas segundo a concepção da alvenaria estrutural, sendo notável, a propósito, a seqüência de acidentes ocorridos na Região Metropolitana do Recife, PE, em construções implantadas conforme a referida concepção construtiva.

O fenômeno da EPU foi inicialmente discutido na literatura cerâmica por Merrit e Peters (1926), e a primeira referência à expansão de blocos cerâmicos se deveu a Palmer (1931), o qual cita que em 1907 já era cogitado que tijolos “inadequadamente” queimados adsorvem água e se reidratam. A engenharia civil, no entanto, só veio tomar conhecimento do assunto em 1947 com a publicação de um estudo do Instituto de Engenheiros da Austrália sobre danos ocorridos em consequência de um fenômeno expansivo até então pouco divulgado, posteriormente designado por EPU. Desde então tem sido freqüente a pesquisa da EPU com a intenção de se aprofundar o conhecimento da influência por ela exercida em peças cerâmicas destinadas a revestimentos, destacando-se, neste sentido, os trabalhos de Schurecht (1928), Pole (1929), Holsher (1931), Palmer (1931), Mellor (1937) e Smith (1955), dentre outros, hoje considerados clássicos da literatura técnica voltada a tal assunto.

Bauer (2000), para explicar a EPU de placas cerâmicas, faz referência à existência da água de constituição e ao seu desprendimento ao longo da queima, e ainda lembra o posterior processo de reidratação que, durante meses e anos, ocorrerá por adsorção em forma de vapor da umidade natural, e através da água do meio-ambiente onde a placa estiver inserida. A EPU, como afirma o autor, tem início no momento em que a peça entra em contato com o meio ambiente, já na saída do forno e, por isso, quando do seu emprego, uma pequena parte do referido fenômeno já ocorreu, e o restante se verificará com o corpo em uso. O tempo de estocagem também poderá influenciar, uma vez que a adsorção do vapor da umidade poderá ocorrer durante tal período de estocagem, conclui.

Segadães (2000) evidencia que desde os anos vinte do século passado já era do conhecimento do meio acadêmico a ocorrência da EPU também em blocos cerâmicos, e que desde aquela época já era notória a deterioração de tijolos cerâmicos devida tanto ao ataque de sais quanto à ação da EPU, e adianta que tais estudos só se intensificaram após a Segunda Guerra Mundial, quando uma série de colapsos nas alvenarias e estruturas de edificações na Inglaterra e na Austrália foi atribuída àquele fato.

Não há registros, contudo, de que, no Brasil, a EPU dos blocos cerâmicos tenha sido, até a última década do século passado, objeto das intensas pesquisas que a gravidade do problema estava a exigir.

Recentemente, estudos realizados na Universidade Federal de Campina Grande/UFCG, voltados ao levantamento das prováveis causas de desabamentos de obras erguidas na Região Metropolitana do Recife segundo a concepção da alvenaria estrutural confirmaram que blocos cerâmicos fabricados na referida região estão, de fato, sujeitos à EPU.

Este trabalho, ao tomar os blocos destinados à construção civil como o alvo das suas pesquisas, tenta trazer à luz parâmetros que possam estar relacionados com a EPU desses referidos materiais, já que, até o momento, praticamente todas as investigações relacionadas a tal fenômeno expansivo estão, de forma quase que exclusiva, voltadas aos materiais cerâmicos de revestimento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Verificar a influência de adições de carbonato de cálcio e de carbonato de magnésio em relação à EPU e em relação às propriedades cerâmicas de blocos destinados à construção civil obtidos às temperaturas de 850, 900, 950 e 1000°C.

1.2.2 Objetivos específicos

Identificar parâmetros que possibilitem a caracterização físico-química e a caracterização mineralógica de blocos cerâmicos destinados à construção civil, e das respectivas matérias-primas e, daí, analisar o efeito

- a) das propriedades mineralógicas das massas “A” e “B” sobre o fenômeno da EPU;
- b) das adições calcárias e magnesianas no comportamento microestrutural dos corpos analisados;
- c) das adições calcárias e magnesianas sobre a correlação entre a EPU e a perda de massa dos corpos queimados a 1000°C e autoclavados;
- d) das adições calcárias e magnesianas sobre a absorção de água de blocos cerâmicos autoclavados moldados a diferentes temperaturas de queima;
- e) das adições calcárias e magnesianas sobre a resistência mecânica de blocos cerâmicos autoclavados moldados a diferentes temperaturas de queima;
- f) da autoclavagem sobre a EPU de blocos cerâmicos moldados com diferentes adições calcárias e magnesianas ao longo do ciclo da queima.

1.3 Justificativa

O produto cerâmico, que na região Nordeste foi o material quase universal para vedação, passou a ser destinado também à alvenaria estrutural, e é marcante, na Região Metropolitana do Recife, o seu emprego em edificações com até quatro pavimentos, seja

pela redução de recursos, seja pela grande rapidez que se pode imprimir à conclusão das obras.

Assim sendo, é fácil constatar que na referida região se tem retornado à concepção construtiva dos tempos que antecederam à implantação hegemônica do concreto armado, tempos esses em que os produtos cerâmicos desempenhavam, com sucesso, a função estrutural.

Não se deve deixar de lembrar, no entanto, que naqueles tempos coloniais a incipiência dos conhecimentos relativos à técnica construtiva gerava as enormes dimensões dos elementos portantes das edificações, fato testemunhado pelas ruínas das fundações e superestruturas dos monumentos parcialmente preservados. O empirismo se opunha à economia e à rapidez, cada vez mais exigidas e só viáveis a partir do status científico conferido à teoria das estruturas; com o procedimento intuitivo daqueles tempos, no entanto, a necessidade de se garantir a estabilidade das edificações, apesar dos elevados custos, do fator tempo negligenciado e das limitações de concepção, acabava por neutralizar a ação nefasta de muitos fenômenos destrutivos, posteriormente descobertos (EPU, por exemplo), já que a grande rigidez que se fazia necessária era satisfatoriamente atingida através das enormes (e anti-econômicas) dimensões dos elementos construtivos impostas pelo exclusivo emprego da alvenaria.

O retorno da alvenaria estrutural com blocos cerâmicos parece se constituir em tendência irreversível, já que ela, quando associada aos modernos conhecimentos da teoria das estruturas, reduz o custo e o tempo necessários à implantação de uma edificação de pequeno e médio portes, e, por isso, se constitui em solução digna e viável para atenuar o “deficit” habitacional do Brasil.

As pesquisas realizadas na Universidade Federal de Campina Grande voltadas aos materiais cerâmicos tornaram-na referência no estudo da EPU de blocos destinados à construção civil, o que, aliado à proximidade geográfica de tal instituição acadêmica com o Recife (± 200 km), fez do Centro Tecnológico da UFCG o local de recorrência para o diagnóstico do desabamento de alguns prédios tipo “caixão” situados na RMR (Região Metropolitana do Recife), já que a pequena profundidade do lençol freático dos locais dos citados desabamentos tornou extremamente provável a efetiva participação daquele referido fenômeno expansivo em tão lamentáveis ocorrências.

A tudo isso acrescenta-se o fato de o autor desta tese desenvolver as suas atividades profissionais nos limites da RMR.

CAPÍTULO 2

Fundamentação teórica

2.1 Conceitos gerais relativos aos materiais cerâmicos

O termo cerâmica se origina da palavra grega *keramicos*, que significa matéria-prima queimada, idéia muito bem associada ao cozimento da sua matéria-prima, etapa necessária à fabricação da cerâmica tal qual era conhecida desde os primórdios da civilização, e como, neste trabalho, continuará a ser considerada; a propósito, referências de Macedo (1997) sugerem o emprego, na Mesopotâmia, dos primeiros fornos destinados à sua obtenção por volta dos 3000 anos a.C.

Norton (1973) faz referência a fragmentos de cerâmica associados a locais de moradia humana desde os tempos mais antigos e afirma que tais fragmentos têm ajudado os arqueólogos na determinação de níveis culturais; admite que a técnica empregada na obtenção da cerâmica (argila calcinada) tenha ocorrido simultaneamente em diversos lugares, ao invés de haver se difundido gradativamente de um determinado ponto, o que não causa estranheza, prossegue aquele pesquisador, pois nada seria mais natural do que se fazerem toscamente vasilhas de argila para cozer alimentos ou moldarem-se vasos com esse material plástico. Concluindo, o autor destaca a grande evolução da cerâmica no começo da era cristã, em Roma, e na China, bem como o grande desenvolvimento na Europa no século XVIII, e o enorme desenvolvimento no fim do século XIX e começo do século XX, quando a ciência e a engenharia foram aplicadas a essa arte antiga.

A argila, matéria-prima da cerâmica tal com entendida por Norton (1973), é um material constituído essencialmente por argilominerais, que são partículas cristalinas com dimensões menores do que 5 μ m, segundo o critério da NBR 7181 (1984), e formadas por silicatos hidratados (VERÇOSA, 2001).

Callister (2002) lembra que recentemente o termo cerâmica tomou um significado muito amplo, e novos materiais, denominados cerâmicas avançadas, se fazem presentes em componentes eletrônicos, de computadores, de comunicação e de engenhos aeroespaciais, e, nesse contexto, a argila deixou de ser considerada a matéria-prima exclusiva para a obtenção do produto cerâmico, quando genericamente conceituado.

É diante de tal cenário que, de uma forma abrangente, se passou a conceituar cerâmica como o composto definido por elementos metálicos e não metálicos cuja ligação interatômica preponderante é a iônica e, assim admitindo, estende-se para outros materiais, além da argila, a possibilidade de formar cerâmica, designando-se então como tradicional a cerâmica cuja matéria-prima seja o material argiloso, pressuposto que inexistia ao se considerar o que veio a ser admitido como a matéria-prima da cerâmica dita avançada.

Prosseguindo, Callister (2002) ratifica o conceito de cerâmica tradicional ao indicar como condição suficiente para caracterizá-la a efetiva preponderância da argila como a sua matéria-prima, e indica a louça, a porcelana, os tijolos, as telhas, os azulejos, bem como alguns vidros e refratários, como seus exemplos representativos.

Diversos especialistas indicam a argila como a matéria-prima essencial à fabricação da cerâmica, sem referência específica ao conceito de cerâmica tradicional, e muito menos ao conceito de cerâmica avançada, e, em tal contexto, são bem representativos os extratos a seguir transcritos, emitidos por três eminentes autores voltados ao assunto :

“A argila foi o primeiro material estrutural inorgânico a adquirir propriedades completamente novas resultantes de uma operação intencional realizada por seres humanos. Esta operação foi a queima (sinterização). (...) Este foi talvez o começo da engenharia de materiais. Estima-se que isto tenha ocorrido no oitavo milênio a.C” (PADILHA,1997);

“O ramo da cerâmica que utiliza as argilas na fabricação de materiais para construção civil é denominado cerâmica vermelha, e é um dos poucos campos da cerâmica em que uma única matéria-prima é empregada na forma final de utilização e queimada sem a adição de outro mineral” (BODIN, 1956);

“Na fabricação de materiais de construção de engenharia civil, tais como tijolos de alvenaria e furados, telhas e alguns tipos de ladrilhos de piso (...) são usadas argilas submetidas a temperaturas de queima que oscilam entre 950 e 1250°C, conforme a natureza da argila, do produto cerâmico, do forno utilizado e das condições econômicas locais” (SOUZA SANTOS, 1992).

O grande desafio de produtos de cerâmicas tradicionais, conforme reconhece Teixeira (2002), é produzir uma grande quantidade de peças com idênticas características técnicas e estéticas, a partir de matérias-primas naturais bastante diferenciadas. Esse

desafio se torna ainda maior quando se leva em consideração o valor agregado (R\$/kg) relativamente baixo das cerâmicas tradicionais, o que inviabiliza a utilização de procedimentos que poderiam minimizar a variação das características das suas matérias-primas.

Tal limitação, agravada pelo fato de a maioria das empresas trabalharem com massas constituídas por uma única argila (ou um número reduzido de argilas), levou Teixeira (2002) a considerar quatro métodos de controle de processo de obtenção da cerâmica tradicional, dentre os quais muito provavelmente estará aquele que, de ante-mão adotado em função do grau de sofisticação da indústria, oferecerá um certo grau de previsibilidade das características do produto acabado.

A partir de um direcionamento específico voltado à engenharia civil, os produtos cerâmicos são representados, no mercado de materiais de construção, por uma imensa variedade conforme a origem, a matéria-prima, o processo de fabricação, e a finalidade a que se prestam. Podem ser agrupados, conforme a finalidade, em:

- a) produtos para alvenaria (de vedação e estrutural) ;
- b) produtos para cobertura e para canalizações, estes normalmente denominados cerâmica vermelha, ou estrutural, ou ainda produtos básicos de cerâmica;
- c) produtos de revestimento (de parede interna/externa e de piso);
- d) produtos de acabamento e utilitários (cantoneiras, louças sanitárias e acessórios), estes denominados cerâmica branca ou de louça;
- e) cerâmica de grês, ou cerâmica de alto grau de vitrificação conforme o caso, e
- f) produtos especiais como as cerâmicas refratárias (normalmente para alvenarias) (VERÇOSA, 2001).

Neste estudo, o termo cerâmica se enquadra na conceituação dada por Souza Santos (1992) que, ao citar a “American Ceramic Society”, subentende-a como o material que trata, especificamente, da natureza e comportamento das argilas, bem como da estrutura e do processo dos materiais obtidos a partir de tais matérias-primas.

2.2 Estrutura mineralógica da matéria-prima da cerâmica tradicional

A argila, matéria-prima essencial da cerâmica dita tradicional, é um mineral constituído essencialmente de argilominerais, que são silicatos hidratados com estrutura

crystalina em camadas, tendo como exemplos representativos a caulinita, a esmectita e a illita (CAPUTO, 1988).

Os argilominerais misturados com a água adquirem plasticidade ao longo de uma amplitude de valores de umidade, o que possibilita a sua conformação. A água, neste caso, funciona como veículo “lubrificante” entre as camadas que são unidas por forças eletrostáticas; os objetos assim conformados são queimados após a secagem, do que se desenvolvem fases vítreas, as quais mantêm unidas as partículas e facilitam a queima, razão pela qual se obtém a cerâmica tradicional a temperaturas abaixo daquelas necessárias para a obtenção da cerâmica dita “avançada”. A microestrutura das cerâmicas tradicionais é constituída, portanto, de fases cristalinas, fases vítreas e poros; a quantidade de fase vítrea e poros é, em geral, superior a 10% (PADILHA, 1997).

Van Vlack (1998) admite que a maior parte das fases cerâmicas, da mesma forma que os metais, são cristalinas, mas, ao contrário dos metais, acrescenta o referido autor, suas estruturas não contêm um grande número de elétrons livres, e, ao lembrar que a formação das estruturas cristalinas dos argilominerais é o resultado do arranjo de unidades tetraédricas (SiO_4)⁴⁻, deixa implícito que essa é a maneira aconselhável para se analisar o comportamento dos minerais formadores destas que são as matérias-primas essenciais da cerâmica tradicional.

Os tetraedros podem estar ligados entre si por vértices comuns e nunca por arestas ou faces, sendo os silicatos classificados em função da forma de ligação das unidades tetraédricas (SOUZA SANTOS, 1992)

O problema da identificação dos argilominerais presentes em uma argila é relativamente simples quando a amostra é pura, isto é, contém apenas um argilomineral. A mistura de argilominerais de vários grupos, no entanto, gera dificuldades, quer pela possibilidade de interferência nos diversos métodos de identificação, quer pelo fato de muitos argilominerais não serem detectáveis abaixo de determinado teor na amostra, teor esse que varia com as características do argilomineral e/ou com o tipo do ensaio; e, assim ocorrendo, conclui-se que, em princípio, faz-se necessária a aplicação de todas ou de algumas das seguintes técnicas investigatórias: composição química, determinação da capacidade de troca de cátions, análise térmica diferencial, microscopia eletrônica, difração de raios X, espectroscopia no infravermelho.

Quimicamente, o material mais simples à base de silicato é o dióxido de silício, ou sílica (SiO_2). Estruturalmente ela consiste em uma rede tridimensional que é gerada quando todos os átomos de oxigênio localizados nos vértices formadores de um tetraedro são compartilhados por vértices de tetraedros adjacentes. e se tal arranjo ocorrer de maneira regular e ordenada, forma-se uma estrutura cristalina.

Dessa forma o material resultante é eletricamente neutro, e todos os átomos possuem estruturas eletrônicas estáveis. Sob essas circunstâncias, a razão entre o número de átomos de silício e o número de átomos de oxigênio é de 1: 2, como indicado pela fórmula química.

No estudo da cerâmica tradicional (aí incluídos os blocos cerâmicos), revestem-se de significado especial os “silicatos em camadas”, os quais se constituem nas estruturas cristalinas dos argilominerais, e, a propósito, um dos argilominerais mais comuns, a caulinita, possui uma estrutura laminar de silicato relativamente simples, com duas folhas. A argila caulinítica é indicada pela fórmula $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH}_4)$, onde a camada tetraédrica de sílica é tornada eletricamente neutra por uma folha adjacente de $\text{Al}_2[(\text{OH})_4]^{2+}$ (CALLISTER, 2000).

2.3 Entendimento do conceito de cerâmica vermelha

Cerâmica vermelha, durante muito tempo também denominada cerâmica estrutural, é um termo impreciso que designa o produto que na língua inglesa é denominado “heavy clay ceramic” (HCP) e “structural clay product” (SCP) e, em francês, “terre cuite” (SOUZA SANTOS, 1992).

O termo “terre cuite” (terra cozida), acima citado, através do qual se designa em língua francesa a nossa “cerâmica vermelha”, se constituiu em bom indicador de que a coloração, por si só, não define as características essenciais exigidas para tais materiais. Duriez (1950), a propósito, em sua obra clássica “Traité de Matériaux de Construction”, emprega o referido termo “terre cuite” relacionando-o, apenas, a um conjunto de produtos cerâmicos em que a resistência mecânica e a porosidade se constituem em algumas das suas propriedades fundamentais, independentemente da coloração por eles assumida.

Duriez (1950) faz referência à eventual coloração vermelha de tijolos associando-a, tão somente, à possível, e não indispensável, presença de óxido de ferro na matéria-prima empregada.

Souza Santos (1992) indica que o termo “cerâmica vermelha” não é preciso porque não indica a qualidade técnica do corpo cerâmico e nem mesmo uma exclusividade dessa cor aos produtos por ela designados, já que existem materiais cerâmicos classificados em tal categoria em cores diferentes da vermelha.

A escolha da cor como critério de classificação de uma cerâmica passou a ser, no entanto, um indicador da sua utilização, já que a matiz apresentada por uma argila após a queima está relacionada com a sua composição mineralógica e com a sua estrutura química, e, dessa forma, tal indicador, na prática, se torna um indício importante das características da matéria-prima utilizada na fabricação do produto.

Com esse método preliminar de classificação, no entanto, não se pretende eliminar a possibilidade de obtenção de cerâmica “vermelha” com o emprego de argilas que queimem em outras cores, desde que as características finais dos produtos obtidos estejam dentro dos parâmetros padronizados.

A par de tais considerações, verifica-se que as argilas plásticas caulino-iliticas, ricas em ferro e em óxidos e hidróxidos de ferro, e por essa razão vermelhas após a queima, se constituem em matérias-primas abundantes de produtos cerâmicos que muito freqüente atendem as características genéricas exigidas, razão pela qual se estende a cor vermelha por elas apresentadas após a queima como referência para quaisquer outros produtos cerâmicos que igualmente atendam os parâmetros exigidos para caracterizar a “cerâmica vermelha”, mesmo que tais produtos se apresentem em outra coloração.

As argilas para a cerâmica dita vermelha são encontradas em estado bruto nas colorações pretas, vermelhas, marrons, amarelas ou esverdeadas. Apresentam-se freqüentemente avermelhadas a 950°C e na cor marrom ou preta a 1250°C (superqueima). São ricas em fundentes (principalmente ferro, potássio e cálcio), e fundem-se parcial (arredondamento das arestas) ou totalmente. Podem apresentar alteração de dimensões produzida por um desprendimento de gases, o que deforma totalmente o bloco com ela obtido, e, a 1450°C, continuam a apresentar a cor marrom ou preta características da superqueima, e geralmente se fundem lenta e totalmente. É esta última característica que exclui o uso das argilas para cerâmica vermelha em cerâmica branca ou na fabricação de materiais refratários de boa qualidade (SOUZA SANTOS, 1992).

Diante de tanta imprecisão e de indicações tão vagas para caracterizar a cerâmica vermelha, encontra-se, no pequeno extrato da afirmação de Souza Santos (1992), acima

transcrita, um mínimo de objetividade quando o referido pesquisador afirma que as matérias-primas destinadas àquele referido material geralmente se fundem totalmente.

É este um conceito desprovido de validade científica, tal o grau de empirismo que o envolve, mas pelo menos serve como referencial excludente para outras aplicações (cerâmica branca ou refratários).

Segundo Ferreira (1972), a cerâmica vermelha é “simplesmente” a designação geral empregada para produtos cerâmicos que se apresentam com tal coloração e são usualmente empregados como material cerâmico em construção civil.

Ferreira (1995) ainda lembra que a cerâmica tradicional não deve ser tida como obsoleta nem de pior qualidade quando comparada com a cerâmica dita avançada e, muito menos, atrasada em sofisticação quanto aos equipamentos usados no processo industrial voltado à sua obtenção, e complementa o seu pensamento afirmando que “em países como o Brasil, onde o ‘deficit’ habitacional é da ordem de doze milhões de unidades, deveria haver um incentivo à exploração desses materiais em escala industrial”.

2.4 Processo de fabricação da cerâmica vermelha destinada à confecção de blocos

A produção de materiais cerâmicos é o resultado de etapas de manufatura voltadas ao processamento de estados sólidos e líquidos, sempre resultando de pelo menos uma dessas etapas reações em temperaturas elevadas que transmitem aos produtos assim definidos as propriedades úteis desejadas.

As principais etapas no processamento de materiais cerâmicos podem ser grupadas da seguinte forma :

- a) preparação das matérias-primas;
- b) conformação (formação ou moldagem) e fabricação;
- c) processamento térmico;
- d) acabamento (SOUZA SANTOS, 1992).

Na sucessão de estágios percorridos até a plena implantação do sistema destinado à obtenção de blocos de cerâmica vermelha, são destacadas as seguintes etapas:

- extração da argila;
- sazonalidade da jazida;

- estoque da matéria-prima;
- homogeneização e mistura;
- estoque da mistura;
- destorroamento;
- laminação;
- mistura;
- conformação;
- corte;
- secagem;
- queima;
- inspeção;
- estocagem;
- expedição.

- A extração da argila é realizada a céu aberto e, para tal, utiliza-se a retroescavadeira ou equipamento semelhante;

- o sazonalamento da jazida é feito a céu aberto, em lotes separados, conforme as características da matéria-prima, e é destinado à estabilização das suas reações físico-químicas, ao longo de um período entre três e seis meses;

- o estoque da matéria-prima é feito a céu aberto, em lotes separados, conforme as suas características e, para que não haja infiltração de água, estes lotes devem ser convenientemente compactados;

- a homogeneização e a mistura são realizadas manualmente ou com o emprego de pás carregadeiras, conforme a quantidade de matéria-prima manipulada e/ou grau de sofisticação do processo;

- o estoque da mistura ocorre em galpão onde o material preparado ficará protegido das intempéries, devendo-se conduzi-lo através de correia transportadora;

- o destorroamento é realizado com o emprego de equipamento que, através de movimentos circulares, permite a quebra de torrões e a homogeneização da massa, à qual se acrescenta água com vistas à obtenção da plasticidade prescrita;

- a laminação é levada a efeito com o emprego de equipamento composto de dois cilindros destinados à compactação e acabamento da etapa de homogeneização da massa;

- a mistura ocorre com a utilização de equipamento que, através de movimentos circulares, permite a quebra da massa compactada proveniente do laminador;

- a conformação é o aspecto final da configuração e das dimensões da massa que, após trabalhada, passa ao estado do material cerâmico acabado. Os métodos empregados para a sua obtenção são a extrusão, a prensagem e a barbotina.

O método adequado à conformação está relacionada com o índice de consistência, que é a relação $(LL - h_n) \cdot 100 / IP$, onde LL, IP e h_n significam, respectivamente, o limite de liquidez, o índice de plasticidade (parâmetros de Atterberg) e a umidade natural; ao índice de consistência igual a 100% implica o teor da umidade natural da massa igual ao seu limite de plasticidade (CAPUTO, 2002)

Ribeiro (2003) associa a trabalhabilidade requerida para a conformação de um produto cerâmico ao grau de dificuldade de manipulação da argila. A uma determinada consistência, a trabalhabilidade pode ser “boa” ou “má”, dependendo do método empregado para a obtenção do corpo cerâmico; a consistência, por outro lado, vai ser decorrente da plasticidade, esta podendo ser associada a um valor numérico de referência, e, ao contrário da trabalhabilidade, ela é mensurável. Enquanto a trabalhabilidade traz consigo elevado grau de subjetividade, a consistência, associada que é à plasticidade, pode ser indicada através de um valor numérico de referência, e é, portanto, desprovida do empirismo relativo à trabalhabilidade.

A extrusão é o resultado da conformação obtida pela compressão resultante da passagem forçada da massa umedecida através de um acessório destacável, após o que é definido o formato requerido para a peça. Ao longo desta fase do processo, parte do ar até então confinado no interior da massa é retirado através do emprego de uma câmara de vácuo. É o método geralmente empregado para a conformação dos blocos cerâmicos destinados à construção civil, e o índice de consistência da massa compatível com esse método deve estar compreendido entre 0,50 e 0,75.

A prensagem é, a conformação resultante da transmissão de esforços de compressão à massa umedecida, podendo as tensões daí resultantes variar de 5 a 700 MPa; a argila destinada à prensagem deve apresentar teor de umidade de moldagem que implique em índice de consistência acima de 0,90.

A barbotina é o método indicado para a fabricação da louça sanitária, e para a sua aplicação a massa no estado líquido é vertida em moldes de gesso que emprestarão a

conformação do corpo a ser obtido; apesar de o método de barbotina não se referir à obtenção da cerâmica vermelha, é ele citado neste trabalho com a finalidade de se dar uma visão abrangente à análise relativa à conformação de um produto cerâmico. A argila destinada à barbotina deve apresentar índice de consistência negativo.

- o corte é o fracionamento da massa saída da extrusora, obtendo-se, através desta etapa, os blocos nos comprimentos previamente estabelecidos;

- a secagem é destinada à perda gradual do elevado teor de umidade do bloco proveniente da extrusora. Tal etapa normalmente ocorre no interior de galpão coberto onde os blocos crus (ainda não submetidos à queima) permanecerão ao longo de um período de até seis semanas.

Para a efetivação desta etapa do processo, algumas empresas aceleram a secagem com o emprego de estufas específicas, o que permite que se atinja a umidade requerida para os blocos crus entre um e dois dias.

Durante a secagem, a água a ser eliminada é aquela que, na etapa de conformação, foi destinada à obtenção de uma massa plástica, e a sua remoção ocorre por evaporação através do calor transportado por uma corrente de ar

Vieira (2003) lembra que durante a secagem surgem tensões geradoras de defeitos que comprometem a qualidade das peças cerâmicas, e chama a atenção para a evolução da retração linear decorrente da perda gradual da água de conformação, fenômeno que pode ser representado pela curva de Bigot, a qual, ao correlacionar o teor da água de conformação com a retração por secagem, estabelece o parâmetro de referência para a definição do tempo ideal de secagem de um corpo cerâmico depois de moldado.

- a queima ocorre com o emprego de fornos que podem utilizar como fonte de energia a lenha, a serragem, os rejeitos de madeira, o óleo ou o carvão mineral. A etapa da queima se consoma ao longo de períodos que podem chegar a 150 horas.

É, durante a queima, que se desenvolvem os fenômenos marcantes relacionados com a alteração das dimensões dos produtos cerâmicos e, a propósito, Marino (1998) afirma que o aumento da temperatura de queima aumenta a retração linear das cerâmicas tradicionais e provoca uma tendência à redução da sua expansão térmica total. embora, segundo o autor, certas regiões das peças apresentem a recuperação parcial das suas dimensões.

Verçosa (2001) destaca a queima como a fase mais importante do processo de fabricação da cerâmica vermelha e, assim considerando, lembra que durante essa etapa se dão reações químicas as mais diversas; algumas rápidas, outras lentas; algumas necessárias, outras indesejáveis; algumas devendo ocorrer no início do processo, outras no fim, disso tudo resultando, acrescenta o referido autor, um problema muito complexo, para cuja solução não influi apenas a temperatura a ser alcançada, mas também a velocidade de aquecimento e de esfriamento, a atmosfera ambiente, o tipo do forno e a característica do combustível.

O principal cuidado no cozimento deve ser o de manter, durante todo o processo, uniformidade de temperatura no interior do forno, sem o quê ocorrerá a má distribuição de calor e, conseqüentemente, a heterogeneidade de características dos produtos obtidos (VERÇOSA, 2001).

Gilson (2003), por sua vez, ratificando pesquisadores que o precederam, mostrou que a retração é significativa até aproximadamente 1200°C, a partir da qual o patamar de multização aparece. Este patamar representa, conforme observado pelo citado autor, uma região de taxa de retração reduzida que contrasta com o respectivo aumento de temperatura. A curva de expansão na sua posição mais extrema pode, nesta referida região, assumir a forma de um patamar horizontal, conclui.

Os tipos de fornos destinados à queima podem ser os intermitentes e os contínuos, estes apresentando a possibilidade de significativo aumento de produtividade em relação aos primeiros;

- a inspeção é feita na saída do forno e, em tal etapa, leva-se a efeito triagem através da qual é rejeitado o produto quebrado, trincado, lascado, com pouca queima ou queimado em excesso;

- a estocagem se dá em área coberta onde os blocos permanecem até o momento da expedição;

- a expedição, via de regra, é efetuada através de caminhos rodoviários, estes, preferencialmente, providos de equipamentos específicos.

De forma sucinta, as cinco etapas, abaixo discriminadas, resumem todo o processo de fabricação de cerâmica vermelha:

- manipulação da matéria-prima: coleta, sazonalidade, estoque e destorroamento

- beneficiamento da matéria-prima: mistura e laminação;
- fabricação do produto cru: extrusão ou prensagem e corte;
- tratamento do produto cru: secagem;
- obtenção e controle do produto acabado: queima, inspeção e estocagem.

Franciulli (2007) evidencia a sobrevida da concepção dos fornos tipo Hoffman, fazendo referência ao lançamento recente de sofisticados instrumentos que, especificamente concebidos como acessórios de tal aparato, são munidos de sensores de temperatura capacitados a fornecer detalhes instantâneos da queima em curso, bem como o histórico das queimas já concluídas.

O forno tipo túnel, concebido desde 1877, é também planejado segundo a metodologia de fornos contínuos e, apesar de apresentar melhor rendimento térmico e economia de mão-de-obra em relação aos fornos tipo Hoffman, tem como inconvenientes as elevadas despesas iniciais para a sua instalação, a limitação inerente à necessidade de que seja sempre o mesmo tipo de material a queimar, e a pouca versatilidade em relação a adaptações de velocidade e intensidade da chama, o que acaba por comprometer a produtividade (VERÇOSA, 2001).

O forno tipo túnel é um longo corredor (as dimensões de altura e largura não estão na ordem de grandeza das dimensões do comprimento), que apresenta, nas proximidades do seu ponto central, uma câmara geradora de calor cuja função é propiciar ao material destinado à queima, ainda cru, um pré-aquecimento. Tal material é introduzido em uma das extremidades do forno e, ao se movimentar sobre vagonetas móveis no interior da câmara de aquecimento, se aproxima da fonte geradora do calor, passa por um valor máximo de temperatura e, gradativamente, se resfria até sair do túnel. A movimentação dos carrinhos (vagonetas) pode ser feita por correntes ou, como é mais freqüente, através da ação de um êmbolo que os impulsiona a uma baixa velocidade.

O comprimento do êmbolo é quase o mesmo de cada vagoneta; toda vez que ele alcança o seu comprimento máximo é recuado e, em um processo cíclico, nova vagoneta vai, por sua vez, empurrar a anterior.

O ar se movimenta em sentido contrário ao do deslocamento das vagonetas, o que, além de acelerar o resfriamento do material prestes a sair do túnel, pré-aquece aquele que,

já colocado na sua outra extremidade, encontra-se na iminência de dar início ao seu deslocamento no interior da câmara.

A seção do forno deve ser pequena, apenas o necessário para o deslocamento do material, com o que se poupa o máximo possível de calor.

2.5 Realidade atual do processo produtivo da cerâmica vermelha no Nordeste

Apesar da forte influência da cerâmica vermelha na economia nacional, bem como da sua elevada produção, tem-se verificado que o tijolo (cerâmico) nas Regiões Norte e Nordeste é um produto comercializado praticamente sem controle de qualidade. Os parâmetros mínimos de utilização, necessários para garantir a sua durabilidade e a sua resistência, são praticamente desconhecidos dos projetistas e construtores das referidas regiões e, como seria de se esperar, as conseqüências desses fatos são fissuras, rachaduras, queda de reboco, umidade excessiva, janelas e portas emperradas, ou até colapso total da construção (VITÓRIO, 1994).

Macedo (1997) já reconhecia que os modelos, as abordagens e as sistemáticas para processos voltados a um gerenciamento ideal são concebidos e destinados, em sua quase totalidade, apenas às indústrias detentoras de alto grau de sofisticação na implementação da sua linha produtiva, e, apesar da importância das empresas de pequeno porte como grandes geradoras de mão-de-obra, poucos são os trabalhos e estudos que permitem a melhoria e a consolidação deste importante segmento industrial, sobretudo no Nordeste, e, nesse contexto, como regra, as empresas fabricantes de blocos cerâmicos, como pequenas empresas que são, apresentam, quando confrontadas com as empresas de médio e grande portes, baixa relação capital/trabalho e reduzida produtividade, do que resultam dificuldades na assimilação de tecnologia de ponta, o que acaba por gerar um ciclo vicioso perverso.

Inseridas em contexto tão desfavorável, as indústrias da cerâmica vermelha geralmente apresentam (no Nordeste, sobretudo) estrutura peculiar de funcionamento, já que manipulam as massas argilosas com escassos conhecimentos das suas características, e não dispõem de condições para efetuar um processamento adequado dos produtos utilizados na construção civil delas obtidos: blocos, telhas, lajotas, manilhas, dentre outros. complementa MACEDO (1997).

As observações de Vitório (1994) e Macedo (1997) não estão muito distantes da realidade atual, conforme observa Loyola (2007), para quem os empresários da indústria da cerâmica vermelha ainda não incorporaram a auto-imagem de minerador, pois, mesmo com algumas iniciativas bem-sucedidas nesta área, a grande maioria do setor não percebeu por completo o quanto a atividade de extração é intrínseca ao segmento da produção cerâmica e está relacionada ao desenvolvimento sustentado das indústrias voltadas à fabricação dos produtos empregados na construção civil..

Herrmann (2007) ratifica o parecer de Loyola (2007) ao reconhecer que nos dias atuais muitas empresas do setor ceramista ainda fazem uso da argila de maneira empírica, e sem os ensaios necessários à sua caracterização. Os ceramistas procuram se sentir “emancipados” em relação aos mineradores. É tudo baseado na “experiência” e sem muito conhecimento técnico, afirma o citado pesquisador.

Nem todos os ceramistas são extratores e nem todo o extrator é ceramista. Cada um tem uma visão segmentada da realidade ou, dito de outra forma, cada qual conhece bem o seu segmento, mas não a outra face do setor. Nesse sentido, os ceramistas que apresentam maiores probabilidades de sucesso são justamente aqueles que têm as melhores informações sobre a mineração, o que não se constitui em regra, conclui HERRMANN (2007).

2.6 EPU dos produtos cerâmicos

Considerando a implantação cada vez mais difundida da alvenaria estrutural com o emprego de materiais cerâmicos, encontra-se a engenharia civil envolvida com a necessidade do aprimoramento da qualidade dos produtos que se destinam à implantação da referida técnica construtiva e, em tal contexto, a EPU se destaca como um dos parâmetros que mais dificilmente estão ao alcance de um efetivo controle de qualidade, tal o caráter insidioso e diversificado de que se reveste o referido fenômeno expansivo; é, pois, com o objetivo de se definir um embasamento técnico e científico ao controle da EPU dos blocos cerâmicos destinados à alvenaria estrutural que se propõe este trabalho.

2.6.1 Conceitos fundamentais para o entendimento da EPU

A EPU dos produtos cerâmicos foi apontada, pela primeira vez, por Merrit e Peters (1926) como a causa do gretamento em vidrados de cerâmicas brancas, tendo Schurecht (1928) demonstrado, através do ensaio acelerado com emprego do autoclave, que em muitos casos o fendilhamento verificado ao longo do tempo era devido a expansões por ele atribuídas à hidratação de silicatos anidros, o que se considera como uma das causas do que veio a ser designado por EPU. Palmer (1931), por sua vez, constatou que os blocos cerâmicos sofrem expansões que variam em função das condições ambientais, em uma alternância dentro do ciclo de molhagem (quando se verifica a expansão) e secagem (quando se verifica a contração), não ocorrendo, contudo, a recuperação plena das suas dimensões iniciais.

Segundo Smith (1955) e Vaughan (1959) a EPU é o resultado da redução da energia superficial, e do aumento gradual da quantidade de fase vítrea e conseqüente ação da água.

Demedeuk e Cole (1960) apresentam uma combinação de parâmetros interferentes na EPU e, assim posicionados, afirmam que ela é o resultado da água condensada por capilaridade, da água física e quimicamente adsorvida, da água quimicamente ligada, ou da combinação de alguns ou de todos estes parâmetros.

Chiari et al (1996), a respeito dos diversos conceitos relacionados com a EPU, afirmam, ao ratificar a teoria de Smith (1955), que os átomos da superfície de um corpo não completam as suas ligações com os átomos vizinhos e, dessa forma, passam a exercer uma grande compressão sobre os átomos do seu interior denominada tensão superficial do sólido. A presença de um líquido adsorvido na sua superfície, ao interagir com os átomos em desequilíbrio energético, aí situados, tende a inverter o sentido da força compressiva e, ao aliviar a referida tensão superficial, provocar uma expansão: a EPU.

Segadães, Carvalho e Ferreira (2003) recordam que os átomos da superfície do corpo sólido se situam em um nível de energia mais elevado do que o dos átomos que se encontram no seu interior, pois, ao contrário do que ocorre com estes últimos, os átomos da superfície não estão quimicamente ligados a átomos vizinhos. Considerando, ainda, que na busca pelo seu estado de equilíbrio os átomos da superfície, para compensar o acúmulo de energia, passam a exercer uma compressão sobre os átomos do interior do corpo sólido, os autores, diante da coerência em se admitir a grande intensidade de valências insatisfeitas na

superfície, aceitam que as tensões geradas pela água aí adsorvida invertem o sentido do estado de compressão interna e dão origem a um comportamento elástico, o que de fato deve contribuir para o surgimento da EPU.

Menezes et al (2005) ratificam que a EPU é o produto da acessibilidade da água, da energia específica, do módulo elástico e das fases presentes na microestrutura do corpo analisado, e recordam que os produtos cerâmicos são constituídos pelas fases amorfas, cristalinas e vítreas.

Assim considerando, Menezes et al (2005), baseados nos estudos de Smith (1955), desenvolvem considerações relativas à influência, sobre a EPU, das fases amorfas, cristalinas e vítreas, lembrando, a propósito, que:

- os materiais amorfos sempre têm uma grande área específica, a exemplo da sílica amorfa, constituinte comum em cerâmicas tradicionais, e elevada energia superficial, contribuindo em muito para a EPU;

- os materiais cristalinos têm área específica menor que a dos amorfos, bem como poucas valências insaturadas na superfície;

- os materiais vítreos não possuem elevada superfície específica, apresentam energia superficial relativamente baixa, mas permitem a difusão dos íons modificadores de estrutura para a superfície; esses íons, quando lixiviados pela água, são removidos e substituídos por íons H^+ , ocorrendo a formação de superfícies semelhantes à dos materiais amorfos, e, dessa forma, surge a possibilidade da abertura de poros anteriormente selados, e, daí, o aumento de superfície acessível à água.

Chiari et al. (1996) evidenciam que os corpos cerâmicos após a queima são, de fato, constituídos pela fases amorfas, vítreas e cristalinas, e a propósito de cada uma delas admitem que:

- as fases amorfas resultam da decomposição dos minerais argilosos durante a queima, e possuem condições propícias a elevadas EPU's por apresentarem alta superfície específica e grande energia superficial;

- as fases vítreas são produzidas pela fusão parcial das argilas que contêm álcalis (principalmente sódio e potássio) em seu estado inicial, e apresentam baixas superfície específica e tensão superficial embora, em contato com a água, desenvolvam uma película superficial com estrutura semelhante à da sílica gel (por trocas iônicas), fato que, por

estimular a adsorção, favorece à ocorrência de EPU, via de regra menos significativas do que aquelas que surgem das fases amorfas;

- as fases cristalinas apresentam área específica muito reduzida e, por essa razão, se torna desprezível qualquer tendência à interação com elementos situados nas proximidades da sua superfície voltada à redução do seu estado energético. É dessa forma que se torna praticamente nula a sua capacidade de adsorção de água, o que reduz drasticamente a possibilidade de EPU.

Menezes et al (2005) ainda comentam que os minerais que entram na composição das matérias-primas dos corpos cerâmicos contêm água nas suas moléculas, a qual, no processo de queima, é volatilizada, e, na continuação de tal processo, se verifica a formação de constituintes amorfos, vítreos e cristalinos. É após o processo de queima, e durante os anos que se sucedem à fabricação do corpo cerâmico, que ocorrerá a reidratação por adsorção de água dos constituintes amorfos e vítreos, concluem.

Bauer (2000), a propósito de tal assunto, confirma que a hidratação por adsorção provoca um aumento de volume dos compostos presentes, expandindo o corpo cerâmico e, a propósito, ainda se refere a dados experimentais que comprovam a expansão de misturas de água com agregados ricos em sílica hidratada e cimento portland. Ele ressalta que a intensidade de tal expansão depende da concentração dos álcalis presentes no referido aglomerante.

Bowman (1993) faz referência a estudos relativos à natureza do processo de adsorção e ao efeito de fatores externos que agem sobre este, e, em tal direcionamento, destacou quatro itens: tempo de exposição, natureza da exposição, características físicas do corpo e composição química do corpo.

Os conceitos que relacionam a interferência da intensidade cristalina com o grau de EPU estão comentados por Marino et al. (2000), os quais admitem que tal fenômeno expansivo depende fundamentalmente das fases formadas no corpo-de-prova considerado; dessa forma, afirmam que uma determinada matéria-prima poderá apresentar comportamentos consideravelmente diferentes se durante a queima reagir diferentemente com os demais componentes da massa, e, assim ocorrendo, der origem a fases diferenciadas. Assim deve-se evitar a generalização dos resultados obtidos, muito embora as fases presentes nas formulações utilizadas compreendam considerável semelhança com

as fases tipicamente encontradas na grande maioria das formulações utilizadas comercialmente para a fabricação dos corpos cerâmicos.

2.6.2 Influência da mineralogia das massas sobre a EPU

A ordem de grandeza do aumento das dimensões dos corpos cerâmicos submetidos a vapor d'água sob diferentes pressões é consideravelmente reduzida quando à sua matéria-prima são acrescentados o feldspato e o quartzito, fato que levou Pole (1929) a admitir que a EPU pode ser controlada através de processos industriais, e, a propósito, Holscher (1931), após ter constatado que valores de EPU são bastante diferenciados para corpos-de-prova que, submetidos a idênticos tratamentos, são moldados com massas de composições bastante diversas, admitiu que a composição mineralógica interfere na EPU de forma mais efetiva do que mesmo a absorção de água.

Menezes et al (2006) fazem referência aos materiais naturais, em especial às argilas, que, por apresentarem composição mineralógica complexa e estarem impregnadas de impurezas, em muito dificultam a análise da influência exercida por cada uma das suas fases sobre a EPU. Por isso, afirmam os referidos pesquisadores, são utilizados nas simulações laboratoriais géis puros de sílica e alumina, bem como géis de sílica e alumina coprecipitados, na tentativa de simular argilas isentas de impurezas. O efeito da composição química dos géis coprecipitados associada às temperaturas de queima está ilustrado na Figura 2.1. Independentemente da temperatura, comentam os citados pesquisadores, pode-se observar na referida Figura 2.1 que há um mínimo de expansão na razão sílica/alumina de 0,67, que corresponde à formação da mulita, e máximas expansões em razões de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ próximas a 1,5 e a 0,3.

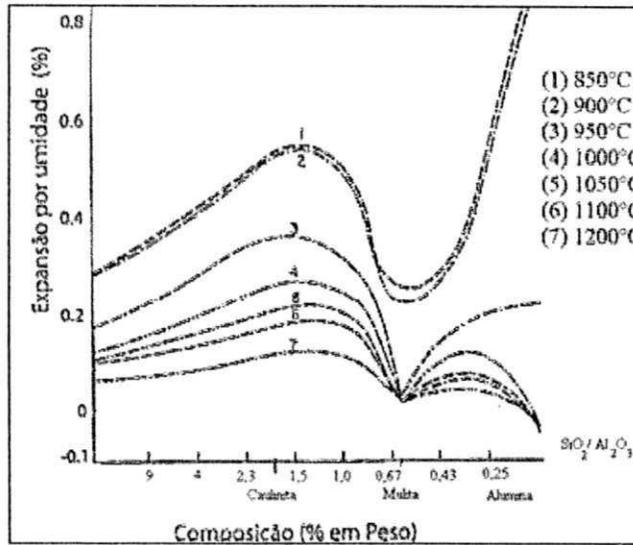


Figura 2.1 Efeito da composição sobre a EPU de géis coprecipitados de sílica e alumina a (1) 850°C, (2) 900°C, (3) 950°C, (4) 1000°C, (5) 1050°C, (6) 1100°C e (7) 1200°C (Demediuk e Cole, 1960)

Admitindo que, ao contrário da fase vítrea, as fases cristalinas não apresentam EPU, Young e Brownell (1959) partiram de um valor fixo de 8% de absorção de água em corpos caulíníticos e verificaram que quanto maior é a razão Al_2O_3/SiO_2 , menor é a EPU, e que quanto maior é a razão $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ maior é a EPU, tendo os dois referidos autores atribuído esta última constatação (aumento da EPU) à presença de álcalis que, por agirem como fundentes, permitem a fusão da sílica, e portanto a formação de fase vítrea, a temperaturas relativamente baixas. Tais constatações estão representadas na Figura.2.2 e na Figura 2.3.

As conclusões de Young e Brownell (1959) podem ser consideradas como a ratificação de algumas das idéias de Smith (1955), o qual já aceitara que as fases cristalinas não apresentavam EPU.

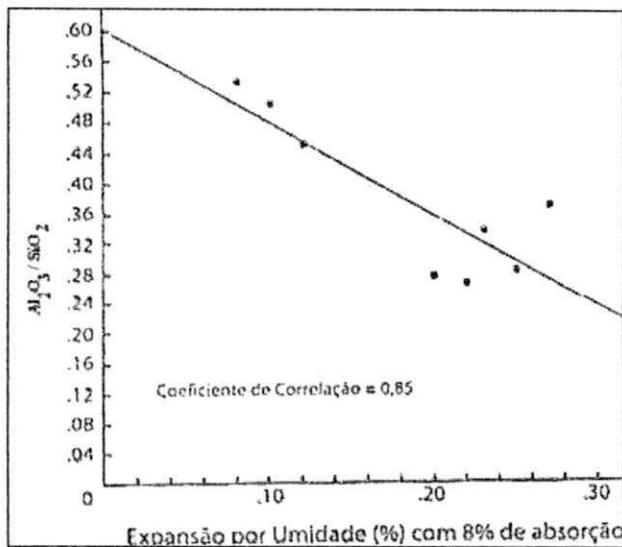


Figura 2.2 Efeito da composição sobre a EPU de argilas comerciais (1) (Young e Brownell, 1959)

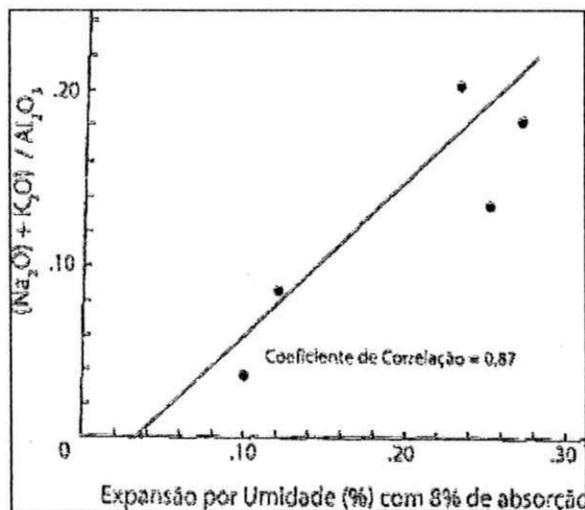


Figura 2.3 Efeito da composição sobre a EPU de argilas comerciais(2) (Toung e Brownell, 1959)

Miranda (2001) observou que, de fato, a EPU tende a aumentar com o aumento da razão $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$ e diminuir com o aumento da razão Al_2O_3 / SiO_2 e, ratificando referências da literatura técnica, atribui tal constatação à composição química da fase vítrea formada durante o resfriamento da fase líquida que surge durante as temperaturas mais elevadas do ciclo de queima. Assim, conclui o referido pesquisador, a magnitude da expansão depende claramente da composição química do produto cerâmico queimado.

Ainda quanto à influência da adição de álcalis, a Figura 2.4 ilustra os resultados obtidos a partir da utilização de sódio e potássio em proporção equimolar. Pode-se

observar, da análise da referida figura, um aumento acentuado da expansão à medida que se eleva o teor de alcalinos, e, ainda, uma retomada de pico do referido fenômeno a 1000°C, provavelmente como conseqüência da formação da fase vítrea que, de forma intensa, ocorre em temperaturas próximas àquela.

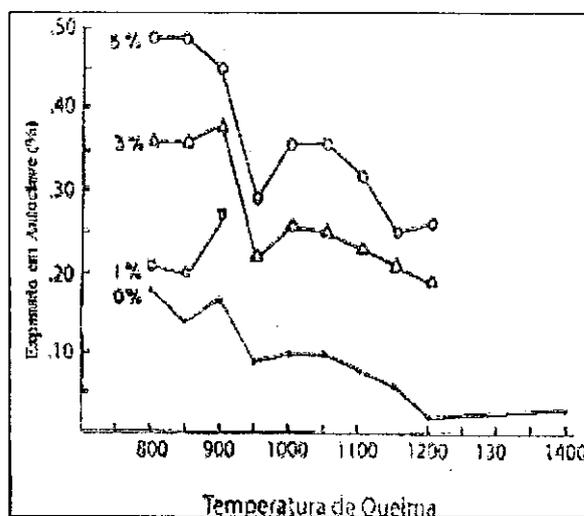


Figura 2.4 Efeito da temperatura de queima sobre a EPU (após autoclavagem) de caulins com adições de álcalis (Young e Brownell, 1959)

O comportamento individual dos álcalis sobre o caulim também foi estudado, e é ilustrado na Figura 2.5. Verifica-se que as séries (por série, entenda-se o conjunto de valores de EPU referentes ao elemento) do sódio (N) e do potássio (K) apresentam uma EPU muito mais intensa do que a da série padrão (P), esta última desprovida de sódio, de potássio e de lítio. Isto pode estar relacionado com a dificuldade dos aluminossilicatos de sódio e de potássio de se cristalizarem, fato observado através da inexistência de qualquer pico resultante da análise da difração de raios X referentes a essas fases.

Já a série do lítio (L) apresenta a menor EPU, o que pode estar associado à formação da mulita e da eucryptita (um aluminato cristalino de lítio), desenvolvidas em tempos bastante precoces.

A redução da EPU, com o tempo, verificada nas séries (K) e (N), deve estar associada ao desenvolvimento paulatino de cristalinidade, o que é demonstrado através da difração de raios X.

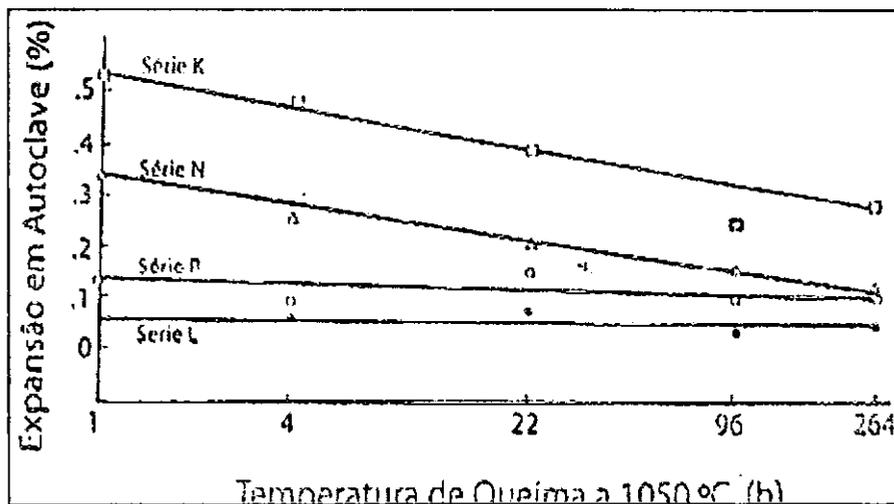


Figura 2.5 Efeito do tempo de queima a 1050°C sobre a EPU do caulim com e sem adição de álcalis (Young e Brownell, 1959)

Thiemecke (1941) constatou que a adição de feldspato a caulins e vidrados aumenta a EPU de amostras destes quando desidratadas a diferentes temperaturas, e Miranda (2001), a propósito de tais adições, refere-se à impossibilidade de se concluir se a natureza da expansão resultante está relacionada com a porosidade dos corpos cerâmicos obtidos.

Um estudo publicado por Milne (1958) sugere que a adição de carbonato de cálcio reduz a EPU e, em contrapartida, Vincenzini e Fiori (1976) publicaram um estudo sobre a expansão de quatro argilas que continham $\text{CaO} + \text{MgO}$ em teores que variavam entre 4,6 e 21,0%. Os resultados desta investigação mostraram efeitos da reação incompleta da decomposição dos carbonatos de cálcio e de magnésio sobre a expansão. Os óxidos formados a partir dos carbonatos excedentes, ao reagirem com a água, dão origem aos hidróxidos e, na evolução de tal processo, se expandem. Tal constatação levou os pesquisadores acima citados, Vincenzini e Fiori (1976), a confirmar que a presença dos óxidos de cálcio e de magnésio podem contribuir para o aumento da expansão, pois, ao reagirem com a água dão origem à formação dos hidróxidos, estes comprovadamente expansivo.

Tal constatação, apesar de correta quanto à interferência da água sobre os óxidos, não contempla os parâmetros efetivamente relacionados com o problema da EPU, tal como esta é conceituada por diversos pesquisadores já citados, dentre os quais SEGADÃES (2003) e FERREIRA (2003).

Estudos posteriores sugerem que durante a queima os óxidos de cálcio e de magnésio reagem com as fases amorfas decorrentes da perda da água estrutural das argilas, e formam fases que são estáveis quando expostas à ação da umidade. Para que tal ocorra, no entanto, é preciso que os fenômenos químicos se dêem durante a queima, e, nesse sentido, a calcita perde o CO_2 por volta dos 900°C e a dolomita entre 700 e 900°C , sabendo-se, por outro lado, que as temperaturas e a velocidade em que ocorrem tais decomposições dependem, dentre outros fatores, do grau de cristalinidade, da granulometria, da intimidade da mistura com as demais matérias-primas que compõem a massa, do grau de compactação, da atmosfera do forno e do ciclo de queima. Assim sendo, pode-se admitir que a introdução de CaCO_3 , e o conseqüente surgimento de CaO na massa pode levar à redução da EPU, desde que sejam garantidas as condições necessárias para que este óxido reaja com os demais componentes da massa e levem à formação de fases efetivamente estáveis diante da influência da umidade.

Diante do exposto, é lícito admitir-se que blocos cerâmicos com reduzido percentual de fases amorfas devem apresentar valores reduzidos de EPU e, por isso, elevadas temperaturas de queima destinadas à obtenção de tais materiais, ao gerar elevada proporção de fases cristalinas, como mulita e anortita, devem contribuir para significativa redução do citado fenômeno expansivo.

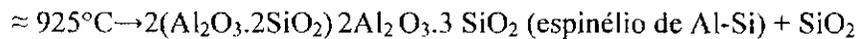
Chiari et al (1996) afirmam que a EPU dos materiais argilosos atinge um valor máximo a temperaturas entre 950 e 1050°C , e diminui a partir da elevação desta última. Os referidos autores também assumem as conclusões de Brindley e Udagawa (1960), e admitem que a decomposição térmica da caulinita começa por volta dos 500°C com a formação da metacaulinita que se transforma em uma fase do tipo do espinélio a aproximadamente 925°C , liberando sílica amorfa. A fase do tipo do espinélio, por sua vez, se transforma em mulita liberando ainda mais sílica amorfa, a qual posteriormente se transforma em cristobalita.

Estes resultados sugerem que o intervalo de temperatura correspondente às mais elevadas EPU's ocorrem com a formação da fase do tipo espinélio e a liberação da sílica amorfa.

É importante ressaltar, arremata Chiari et al (1996), que a seqüência apresentada nos parágrafos anteriores parece ser válida para as caulinitas bem cristalizadas, e, a propósito, alguns pesquisadores foram incapazes de detectar a presença da fase do tipo

espinélio para argilas caulínicas não muito bem cristalizadas, razão pela qual, para esses materiais, por volta dos 950°C se insinua a formação de uma fase altamente amorfa que se incorpora à sílica amorfa, para que, juntas, dêem origem a elevadas EPU.

Marino (1998) detalha a formação das fases relativas à evolução da caulinita - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - e para tanto apresenta as seguintes configurações químicas das suas transformações:



A fase denominada metacaulinita, confirma Marino (1998), é amorfa, ou, como ele bem explica, é o resultado da saída das moléculas de água que faziam parte da caulinita e da conseqüente destruição do arranjo ordenado que caracteriza a sua estrutura cristalina. Processo análogo ocorre com os demais argilominerais.

Com o objetivo de avaliar os efeitos da adição de carbonato de cálcio sobre a EPU, estudos foram desenvolvidos na Universidade Federal de São Carlos e na Universidade Federal de Santa Catarina e, nesse sentido, Chiari et al (1996) observaram que a adição de 15% de CaCO_3 à massa analisada correspondia aos valores mínimos de EPU, conforme está indicado na Figura 2.6.

Lira (1997), no seu estudo voltado à análise da EPU de materiais cerâmicos porosos para revestimento, concluiu que o aumento dos teores de CaO na constituição da massa cerâmica proporciona a redução da expansão à medida que favorece a formação das fases cristalinas de aluminossilicatos cálcicos e uma menor formação de fase vítrea, e o aumento dos teores de MgO, por sua vez, favorece a EPU quando se hidrata para formar a brucita $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$.

Quanto ao efeito dos carbonatos de cálcio e de magnésio na EPU de materiais cerâmicos para revestimento, Lira (1970) ainda afirma ter verificado uma significativa diminuição ao ter adicionado 15% de carbonato de cálcio à massa utilizada na confecção das amostras, conforme indicado na Figura 2.7, o que é devido à formação da fase cristalina anortita.

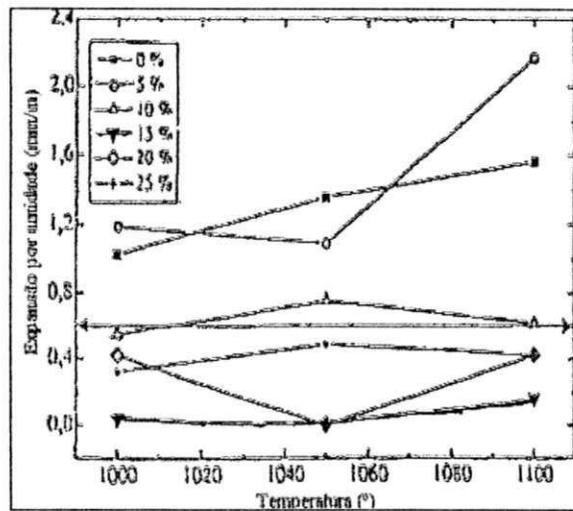


Figura 2.6 Variação da EPU de massas contendo diferentes teores de calcita em relação à variação da temperatura de queima (Chiari, 1996)

Em relação à adição de carbonato de magnésio, a referida pesquisadora admitiu que o aumento da EPU em corpos-de-prova obtidos a temperaturas de 1050°C e 1125°C pode estar relacionado à formação de periclásio, cujo teor aumenta à medida que se acrescenta o $MgCO_3$ à matéria-prima argilosa, e admitiu também que tal mineral apresenta uma expansão marcante ao se reidratar e formar a brucita [$Mg(OH)_2$], que, conforme já abordado, favorece a ocorrência da EPU. Ver, a propósito, a Figura 2.8.

A crescente EPU conseqüente do aumento do teor de carbonato de magnésio acrescentado à massa argilosa, volta a afirmar Lira (1997), é também devida à formação mais intensa da fase vítrea e à tendência apresentada por tal óxido (MgO) de permanecer na fase amorfa e, dessa forma, tender à formação de hidróxido. A partir dos 1200°C, com a formação da fase cristalina mulita, e com o consumo de MgO na formação de safirina, o $MgCO_3$ acabará por provocar uma redução de EPU, conclui.

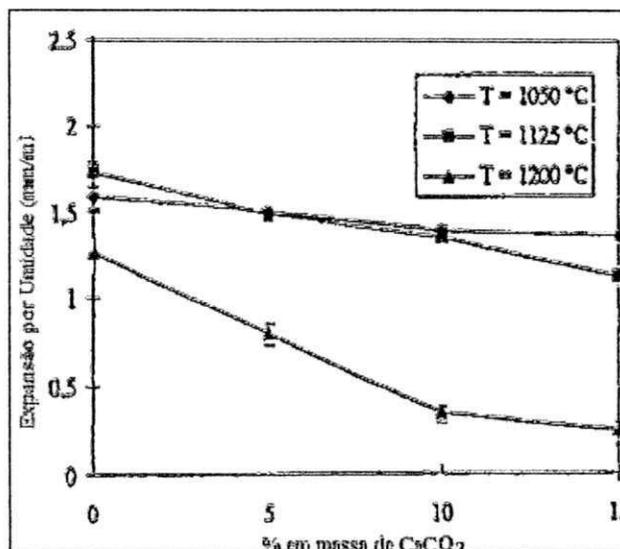


Figura 2.7 Efeito da adição de CaCO₃ sobre a EPU (Lira, 1997)

Tal como Lira (1997), Pereira (2002), ao constatar que a redução da EPU em revestimentos cerâmicos estava relacionada com a adição de cálcio às argilas naturais empregadas na obtenção de tais materiais, admitiu que a formação de fase vítrea, de fato, contribui para o aumento da EPU e, em contrapartida, também admitiu que a presença de CaCO₃ pode influir na formação de fases cristalinas, notadamente a anortita.

Os citados pesquisadores ainda verificaram que para as argilas naturais vermelhas por ele analisadas, quanto maior é a razão $(CaO + MgO) / (Na_2O + K_2O)$, menor é a EPU resultante, o que está de acordo com outras citações relativas ao assunto.

Rodrigues (2002) indica que os óxidos de cálcio e de magnésio de fato reagem, durante a sinterização, com as fases amorfas, levando à formação de fases mais estáveis frente à umidade. A intensidade da influência dos citados óxidos sobre a EPU vai depender da composição do restante da peça, da temperatura e do ciclo de queima, conclui.

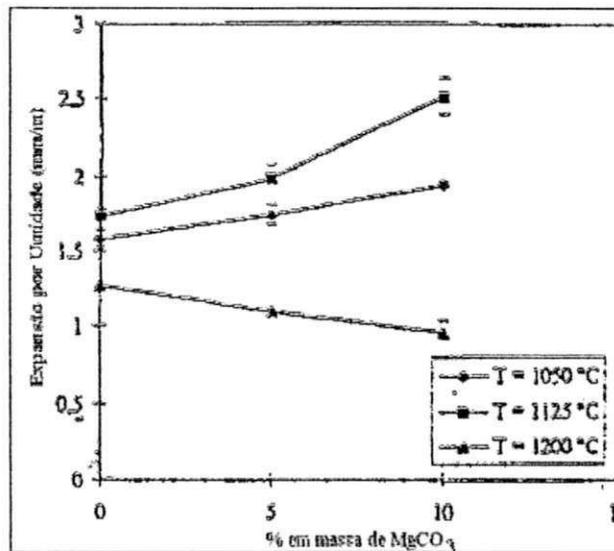


Figura 2.8 Efeito da adição do MgCO₃ sobre a EPU (Lira, 1997)

2.6.3 Influência da temperatura de queima sobre a EPU

Chiari et al (1996) ao aceitarem que a expansão de um corpo cerâmico está, de fato, relacionada com as adsorções física e química que ocorrem no seu interior, afirmaram, no entanto, que o reaquecimento e a conseqüente remoção da água até então adsorvida, ao contrário do que seria de se esperar, não promove a recuperação plena das dimensões originais do protótipo analisado, pois, além de o processo de adsorção se iniciar com a amostra ainda no interior do forno, a exposição da mesma ao ambiente provoca microfissuras devidas ao alívio das tensões térmicas, do que resultam expansões irreversíveis.

Bowman (1996) concluiu que cargas externas, sais e água congelada podem induzir a expansões, e ainda destacou possíveis deficiências dos métodos clássicos empregados na simulação laboratorial da EPU, e, na tentativa de minimizar distorções durante as pesquisas relacionadas a tal fenômeno, sugeriu o emprego do dilatômetro, com temperaturas de queima de 450°C, deixando evidente, contudo, a necessidade de procedimentos complementares, aí incluídos estudos detalhados sobre as transformações das fases.

Em 1958, Milne (1958), nos seus estudos destinados à caracterização da argila caulínica constatou que ao aumento de temperatura de queima de um corpo cerâmico correspondia um decréscimo da sua EPU, atingindo esta um mínimo a aproximadamente

1070°C, a partir de quanto, até 1100°C, verificava-se um reduzido aumento e posterior decréscimo do referido fenômeno. A Figura 2.9 ilustra este fato.

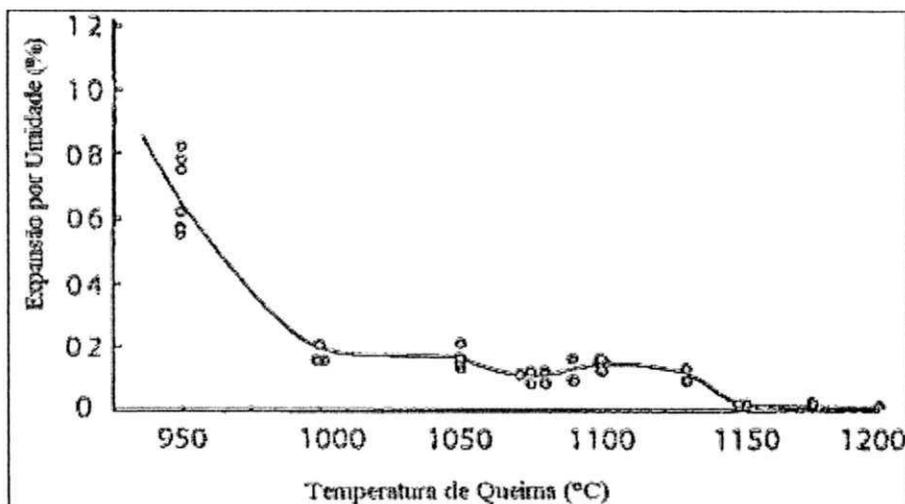


Figura 2.9 Relação entre a temperatura de queima e a EPU após a autoclavagem por 96 h a 200°C [Milne, (1958)]

Young e Brownell (1959), também com o emprego de argilas basicamente caulínicas, observaram, de forma análoga às constatações anteriores, uma tendência ao decréscimo da EPU correspondente ao aumento da temperatura de queima, atingindo tal tipo de expansão o seu valor mínimo aos 850°C. A partir daí, no entanto, a pesquisa constatou uma inversão de tal correlação, com um pequeno aumento da EPU entre 900 e 950°C e, ao término de tal zona de inversão, a retomada da tendência ao decréscimo da EPU à medida que se dava o aumento da temperatura de queima, como pode ser visto na Figura 2.9.

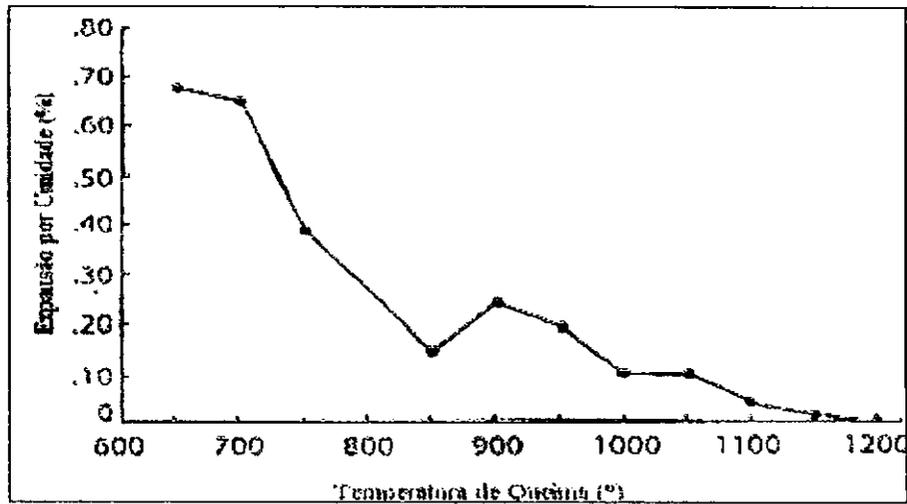


Figura 2.10 Efeito da temperatura de queima sobre a EPU (em autoclave) de argilas comerciais (Young e Brownell, 1959)

Em uma tentativa de justificar a correlação entre variação da EPU e variação da temperatura de queima, Young e Brownell (1959) creditaram tal ocorrência à constatação de que durante a queima os argilominerais presentes nas massas cerâmicas perdem íons oxidrila (radicais OH) da sua constituição e têm, por isso, a sua estrutura cristalina destruída. Prosseguindo a queima, os seus constituintes amorfos passam a formar, com o aumento da temperatura, novos compostos cristalinos que, estáveis, pouco contribuem para a EPU.

Dessa forma, concluem os citados pesquisadores, baixas temperaturas de sinterização, ou ciclos de sinterização muito curtos, podem favorecer a permanência de alguns compostos resultantes dos argilominerais na fase amorfa, e, ao contrário, elevadas temperaturas de sinterização podem favorecer a formação de um novo ciclo de minerais cristalinos, e, por isso, tender ao decréscimo da EPU.

Posteriormente, Cole (1962), utilizando uma argila caulínica e argilas cujos argilominerais predominantes eram caulinita e montmorilonita, e outras cujos argilominerais eram caulinita e mica moscovita, observou, em todos os casos, um comportamento semelhante ao até aqui descrito, ou seja, a elevação da EPU a partir de um valor mínimo, posterior passagem por um valor máximo e, por fim, retomada da tendência de redução atrelado ao aumento da temperatura de queima.

Conforme foi também admitido por Cole (1962), o comportamento da EPU em função da temperatura de queima, no entanto, se mostra, em alguns casos, bastante sensível às matérias-primas utilizadas na confecção das amostras, estando tal suposição apoiada em estudos realizados a partir de uma composição à base de caulinita, quartzo e mica, verificando-se um pico de EPU a aproximadamente 1000°C para amostras naturais (não autoclavadas) aos 90 dias após a queima, e para amostras autoclavadas a diferentes intervalos de tempo, conforme indicado na Figura 2.11. Dessa forma, não mais se verificou a existência de um mínimo de EPU seguido de intervalos oscilatórios, conforme o indicado na Figura 2.10, mas, conforme já analisado, um pico de expansão aos 1000°C.

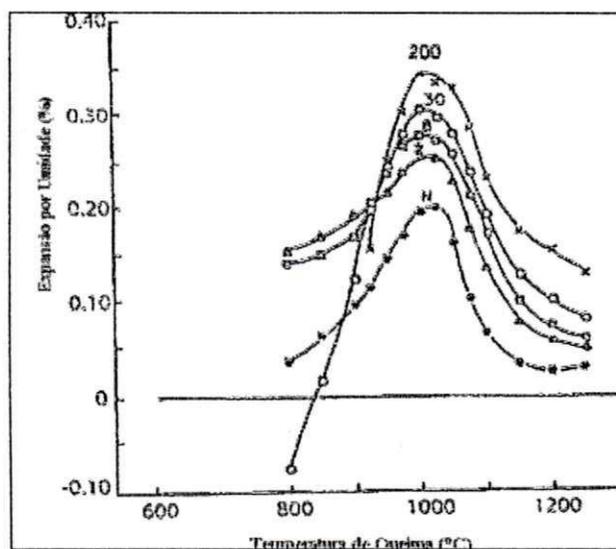


Figura 2.11 Efeito da temperatura na EPU do corpo cerâmico:

N- expansão natural (amostra não autoclavada) após 90 dias;
 2, 8, 30 e 200- quantidade de horas correspondentes a tratamento em autoclave (Cole, 1962)

A variação da EPU frente à variação de temperatura de queima ainda não é totalmente compreendida. Alguns autores admitem que tal correlação pode sofrer a influência decorrente da formação de um espinélio de alumínio e silício com liberação de sílica amorfa a aproximadamente 925°C e à transformação do espinélio em mulita, com mais liberação de sílica amorfa na faixa de temperatura entre 1050 e 1100°C.

A formação da fase espinélio, no entanto, só foi observada em caulinitas bem cristalizadas.

A única certeza está no fato de haver a formação de uma fase amorfa durante a variação de temperatura de queima, o que responde pelo pico de EPU que, sempre, se observa durante um estágio longo de aquecimento das massas destinadas à obtenção dos corpos cerâmicos.

Simultaneamente, vários estudiosos tentam antecipar os efeitos dos muitos anos necessários à consumação da EPU e, nesse sentido, têm sido analisadas a velocidade de aquecimento na requeima, a temperatura máxima de requeima, como também o tempo de permanência nessa temperatura, que, ao que parece, deve ser o mínimo possível, com o que se atenuará o fenômeno da histerese.

Tais pesquisas têm se prestado à indicação de procedimentos básicos, apesar das muitas divergências no que se refere aos ciclos de queima e ao ensaio que possa simular o lento e nefasto efeito das expansões que estarão por ocorrer.

Com base na Figura 2.12, pode-se observar que a relação entre a área específica de um corpo e a sua EPU é dependente da temperatura de queima. Esta constatação também foi especulada por pesquisadores que observaram um duplo efeito da temperatura de queima sobre a relação da área específica com a EPU, conforme ilustra a Figura 2.13, através da qual é possível constatar que com o aumento da temperatura de queima há, efetivamente, uma redução da área específica devida, tudo indica, à vitrificação do corpo cerâmico.

Tudo isto posto constata-se que a EPU inicialmente se eleva para em seguida decrescer com o aumento da temperatura de queima, o que reforça a hipótese, anteriormente apresentada, segundo a qual o aumento da EPU deve estar correlacionado com modificações da composição mineralógica resultantes de fases potencialmente mais expansivas, enquanto o decréscimo deve estar relacionado com a diminuição da área específica.

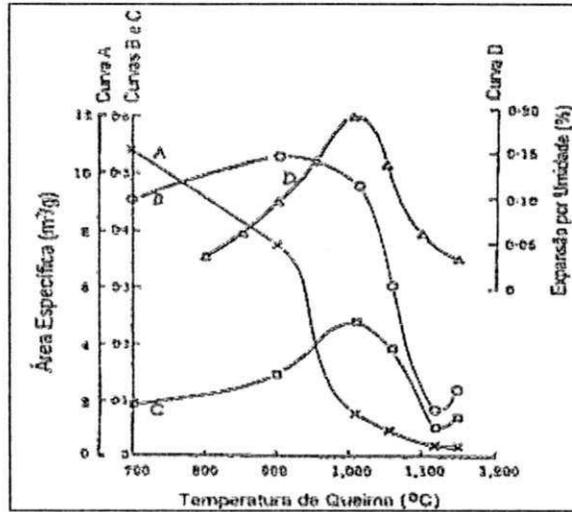


Figura 2.12 Área específica e EPU versus temperatura de queima:

A- área específica total; B- área específica a partir do volume de poros com diâmetros compreendidos entre 0,08 e 0,77µm; C- área específica a partir do volume de poros com diâmetros compreendidos entre 0,2 e 0,77µm; D- expansão natural após 90 dias (Cole, 1962).

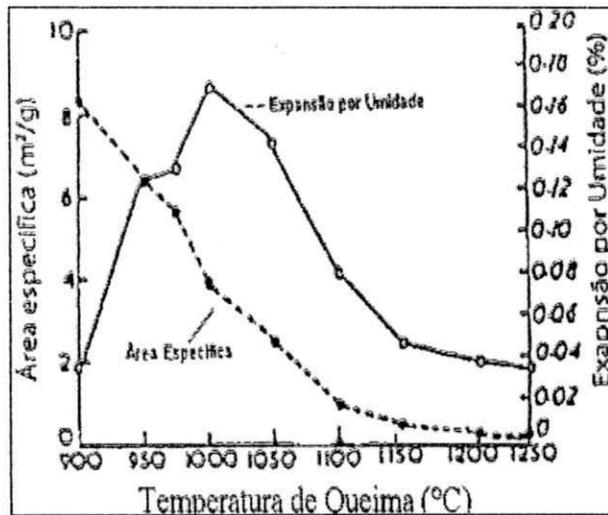


Figura 2.13 Relação entre a EPU (autoclave – 0,5 h e 344,5 kPa), área específica e temperatura de queima de uma cerâmica branca (Vaughan e Dinsdale, 1962)

2.6.4 Influência da porosidade, da absorção de água e da área específica sobre a EPU

Schurecht (1928) admitiu que a menor tendência ao fissuramento decorrente da EPU estava estreitamente relacionada com o grau de porosidade dos corpos-de-prova analisados.

Menezes et al (2006) lembram que Milne (1958), através de pesquisas com corpos-de-prova basicamente cauliniticos, sugeriu uma correlação linear e universal entre a EPU (após autoclavagem) e a absorção de água, conforme indicado na Figura 2.14; lembram também que pesquisas realizadas por Young e Brownell (1959), com corpos cerâmicos igualmente autoclavados e moldados com argilas preponderantemente cauliniticas, cujos resultados estão indicados na Figura 2.15, indicaram uma tendência à constância da absorção de água até a temperatura de 900°C, e apenas acima desta temperatura os referidos pesquisadores passaram a admitir a efetiva tendência preconizada por Milne (1958) relativa à linearidade entre a redução da absorção de água e a redução de EPU. Com tal constatação Young e Brownell (1959) concluíram que a correlação entre a absorção de água e a EPU não pode ser considerada como um efetivo indicativo da EPU “potencial”, dada a interferência da temperatura de queima na correlação entre estes dois parâmetros (absorção de água versus EPU).

Inzigneri e Fusarini (1960), sem terem feito referência explícita a valores de temperaturas de queima, destacaram que a porosidade aparente, apesar de se constituir em parâmetro de grande e efetiva significação, não apresenta uma relação diretamente proporcional ao desempenho estrutural dos corpos cerâmicos. Esta afirmação se constituiu em indicio do que veio a se comprovar quanto à relatividade da interdependência entre a expectativa de EPU máxima futura e a absorção de água.

Menezes et al (2006), através de estudos posteriores, admitiram que a relação entre a absorção de água e a EPU é dependente de outros fatores, tais como a composição química das matérias-primas e a cinética das reações, o que em muito dificulta a definição de um modelo que incorpore os dois referidos parâmetros, passando cada caso, portanto, a apresentar características peculiares, concluem.

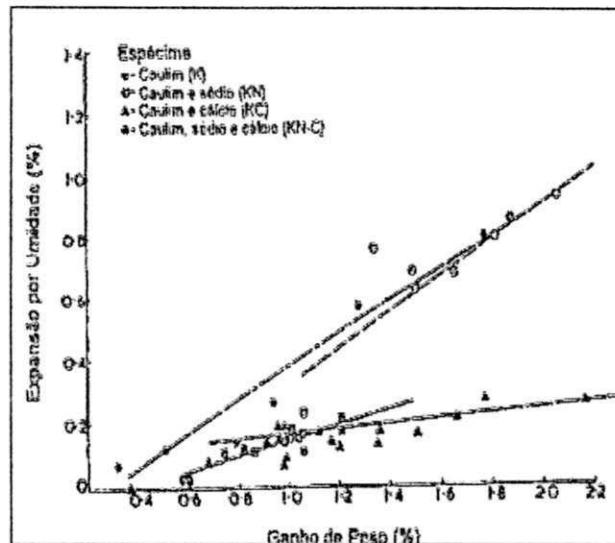


Figura 2.14 Relação entre a EPU e a absorção de água após autoclavagem por 96 h a 200°C (Milne, 1958)

Lira (1997) admite que a absorção de água reflete as transformações térmicas durante a queima dos corpos-de-prova e, para justificar tal afirmação, a referida pesquisadora lembra que a redução da absorção de água é justamente o resultado da ação do aumento da temperatura de queima; a redução da absorção de água se dá como consequência de uma densificação do material, em decorrência da coalescência das partículas e formação da fase líquida, e esta, formada durante a sinterização, tem diminuída a sua viscosidade à medida que aumenta a temperatura, o que lhe permite preencher os vazios entre as partículas e reduzir a porosidade da peça. Corpos menos porosos apresentam diminuição da absorção de água, pois reduzem a sua porosidade aberta, conclui aquela autora.

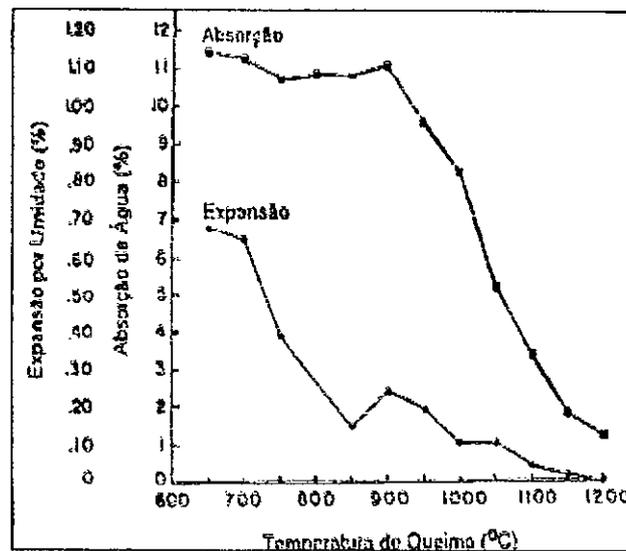


Figura 2.15 Efeito da temperatura de queima sobre a EPU e absorção de água (Young e Brownell, 1959)

Hosking (1978) verificou que a acessibilidade da água e o número de zonas potencialmente hidratáveis são determinados, em grande parte, pelos poros e pela área específica dos corpos e, a propósito, Smith (1955) já preconizava que a variação da porosidade aparente aumenta com o passar do tempo, pois as forças de expansão provocadas pela água adsorvida, afirmava este citado estudioso, promovem o surgimento de uma geração de microporos que, aumentados com o tempo, contribuem para o surgimento de um processo corrosivo da água sobre a fase vítrea o que, por sua vez, contribui para o aumento do volume total de poros, formando-se, dessa maneira, um intrincado ciclo vicioso.

Miranda (2001) afirma que todos os produtos cerâmicos porosos apresentam o fenômeno da EPU, cuja intensidade é dependente dos constituintes e da área específica da peça cerâmica pesquisada e, prosseguindo, ele conclui que a expansão produzida pelas diferentes ações da umidade sobre os corpos começa quando estes ainda estão no interior do forno, na medida em que absorvem umidade através das suas áreas específicas, processo este que não cessa quando o produto cerâmico é removido para o meio externo, pois a expansão continua durante e após o armazenamento, embora em uma proporção gradualmente reduzida, durante longo período de tempo.

Dentro do intervalo habitual de queima das indústrias cerâmicas de revestimento e tijolos, verifica-se que a EPU é proporcional à área específica da massa utilizada e, ao contrário do que se pode concluir a partir da análise de Hosking (1978), a influência da porosidade sobre a EPU decorre da maneira como ela interfere na quantidade de vazios internos conectados com o exterior, ou dito de outra maneira, na permeabilidade por ela gerada.

Menezes et al (2006) acreditam que a grande influência exercida pela área específica sobre a EPU decorre do efeito das reações da hidratação necessária à ocorrência do referido fenômeno expansivo, reações essas que dependem da quantidade de compostos reativos acessíveis à interferência química da água.

Diante do exposto, e considerando a constatação de que a acessibilidade da água a zonas potencialmente hidratáveis de fato interferem na EPU, Cole (1962) admitiu a interdependência entre a dimensão de poros e a temperatura de queima, e correlacionou tal associação à EPU, o que está indicado na Figura 2.16, em que se considerou como protótipo da pesquisa um composto de caulinita, mica e quartzo.

Ressalte-se que a relação entre a porosidade e a área específica dos corpos cerâmicos sob a ação prolongada da água não permanecem constantes com o decorrer do tempo (dezenas de anos), o que dificulta mais ainda a efetiva correlação combinada de ambas com a EPU.

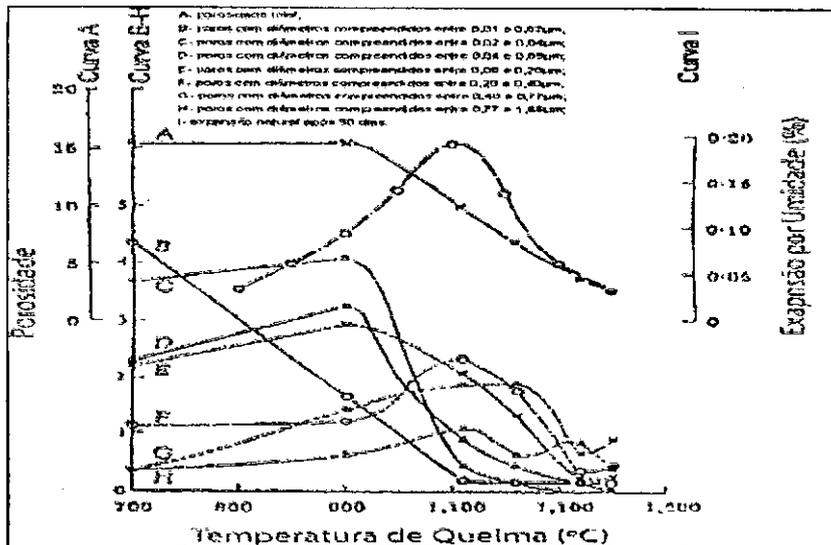


Figura 2.16 Porosidade e EPU versus temperatura de queima

A- porosidade total;

B- poros com diâmetros compreendidos entre 0,01 e 0,02 μ m;

C- poros com diâmetros compreendidos entre 0,02 e 0,04 μ m;

D- poros com diâmetros compreendidos entre 0,04 e 0,08 μ m;

E- poros com diâmetros compreendidos entre 0,08 e 0,20 μ m;

F- poros com diâmetros compreendidos entre 0,20 e 0,40 μ m;

G- poros com diâmetros compreendidos entre 0,40 e 0,77 μ m;

H- poros com diâmetros compreendidos entre 0,77 e 1,66 μ m;

I- expansão natural após 90 dias. (Cole, 1962)

2.6.5 Conceitos específicos da EPU

Considerando que a EPU natural é um processo extremamente lento, faz-se necessário o desenvolvimento de simulações laboratoriais com protótipos do material cerâmico de referência e, neste sentido, ao se acelerar tal ocorrência, são consideradas três acepções do referido fenômeno expansivo:

- a EPU “atual”;
- a EPU “potencial”, também designada por EPU “total”;
- a EPU “futura”.

A EPU “atual” caracteriza a efetiva expansão do corpo cerâmico desde a sua fabricação até o momento do seu emprego, e presta-se à mensuração da influência do referido fenômeno expansivo em falhas do produto acabado. Ela é devida à ação da umidade natural, e ocorre, de forma espontânea, desde a queima até o instante do início do ensaio;

a EPU “potencial” (ou EPU “total”) permite a previsão da expansão do corpo cerâmico desde a sua fabricação até o término do que se considere como a sua vida útil. Ela ocorre desde a queima até a conclusão do processo de envelhecimento, podendo este processo ocorrer de forma natural, muito lenta, ou através de processos acelerados em laboratório;

a EPU “futura” é considerada como a expansão que ocorre no corpo cerâmico desde um instante tomado como referência (normalmente o momento do seu emprego) até o término do que se considere a sua vida útil.

2.6.5.1 Análise e determinação da EPU “atual”

A determinação da EPU “atual” parte do princípio, já abordado neste trabalho, segundo o qual tal expansão é o resultado da adsorção física e química da umidade no interior do corpo cerâmico, admitindo-se, portanto, possível revertê-la através de um tratamento de reaquecimento do qual resulte o valor da pressão de vapor da água adsorvida superior ao valor da energia de adsorção (LOMAX e FORD, 1983).

A temperatura na qual o referido reaquecimento deve ocorrer é objeto de muita controvérsia, e, a propósito, em alguns casos tem sido constatada a impossibilidade de remoção total da expansão sem o aquecimento a temperaturas próximas ou até mesmo acima das temperaturas da queima original. Em tais valores, Hosking e Hueber (1959) verificaram retrações de queima em valores que tornam praticamente impossível a distinção entre os dois efeitos (retração devida à perda de água adsorvida e aquela devida a uma queima a temperaturas próximas ou acima das temperaturas da queima original).

Diante do exposto, pode-se admitir a ocorrência da expansão por umidade “aparente” que, medida por diferença entre os comprimentos anteriores e posteriores ao reaquecimento em temperaturas elevadas (superiores a 573°C), tem “embutida” não só a quantidade efetivamente recuperada de EPU, mas também as variações de dimensões devidas a efeitos de inversão do quartzo, diferenças de coeficientes de dilatação térmica, transformações de fases, retrações por sinterização e, em muitos casos, início da EPU após o reaquecimento (BOWMAN, 1996).

Os fatos sugerem que o reaquecimento não deve ocorrer a temperaturas maiores do que a de inversão do quartzo, sendo necessário, no entanto, aquecimento suficientemente

elevado para que seja removida a umidade adsorvida, podendo-se admitir como satisfatórios valores entre 400 e 500°C (ROBINSON, 1985).

Cole e Banks (1991) advogam que reaquecimentos em temperaturas da ordem de 500°C não fornecem a expansão total sofrida pelo corpo, já que não o conduz a um estado semelhante ao da saída do forno, e ressaltam que a cinética de nova expansão após a queima não é igual à cinética da expansão original. Sugerem temperaturas de requeima da ordem de 900°C, indicando que estas fornecem valores de EPU equivalentes a cerca de 90% da EPU ocorrida no corpo desde o resfriamento no forno, e que os valores obtidos com a queima a 500°C subestimam a expansão em no mínimo 0,01% e, quanto à influência da transformação do quartzo α para o quartzo β , afirmam que a possível expansão permanente provocada por tal mineral quando da requeima a temperaturas acima de 573°C só se dá em corpos de textura grosseira, queimados a temperaturas inferiores a 1000°C.

A fina textura inerente às massas utilizadas na confecção dos produtos cerâmicos, e a ordem de grandeza das temperaturas de queima empregadas na sua fabricação, em muito atenua o efeito da expansão provocada pela inversão do quartzo α em quartzo β .

Estudos em curso evidenciam que o grau de retorno das dimensões originais de um corpo cerâmico depois de submetido a um tratamento térmico depende não apenas da temperatura de requeima mas também da duração deste tratamento, bem como da composição da matéria-prima empregada, da intensidade da temperatura máxima alcançada e da taxa de aquecimento, o que indica a impossibilidade de haver um método único para que seja aferida a EPU já desenvolvida (BOWMAN, 1999).

Foram observadas, na requeima de um material cerâmico, evidências de histerese, como também ordem de grandeza e direção diferenciadas da expansão dos seus cristais, o que acaba por dar origem a microfissuras que, no processo de resfriamento, apesar de tenderem à obliteração, deixam evidentes vestígios que acabam por impossibilitar o retorno pleno das dimensões originais do corpo-de-prova utilizado.

Outros fatores ainda colocam em discussão a efetiva participação da EPU na alteração das dimensões do material cerâmico, pois a exposição ao meio-ambiente também faz surgir microfissuras resultantes do alívio das tensões térmicas.

Cargas externas, sais e água congelada também induzem à expansão.

Gomes et al. (2000) estudaram uma amostra de cerâmica vermelha visando à verificação da influência da temperatura sobre a EPU “atual” e, a partir dos resultados

obtidos em tal pesquisa, concluíram que não chega a ser significativa a diferença de valores de tal fenômeno ao longo do intervalo de temperaturas entre 500 e 550°C. Concluíram, também, que a temperatura de 900°C, próxima da temperatura de queima das amostras originais, pode ser considerada demasiadamente elevada para o reaquecimento destinado à determinação da EPU “atual” pois, a tais valores de aquecimento, não mais seria possível separar a retração devida à recuperação da EPU da retração devida às alterações estruturais causadas pelo prolongamento do tratamento térmico.

No que se refere à determinação da EPU “atual”, Menezes et al. (2005) lembram que grande parte da discussão voltada ao referido tema diz respeito:

- à possível influência da inversão do quartzo,
- à diferença de expansão devida à alteração da cinética dos corpos-de-prova submetidos a requeimas além dos 500°C, e
- à indução de re-sinterizações decorrentes de requeimas entre os 800 e 900°C.

É diante de todas as considerações apresentadas neste item que a literatura técnica, ao lidar com tantas incertezas, apresenta, para a verificação da EPU “atual”, duas linhas antagônicas de ação, abaixo indicadas:

- reaquecimento a temperaturas inferiores a 573°C, com o que se evita a transformação de fases, sobretudo a transformação do quartzo α para o quartzo β ;
- reaquecimento a temperaturas elevadas, maiores do que 573°C, com o que se consegue simular em laboratório as condições de queima do produto industrializado, e se reconstituir, portanto, a EPU das condições reais.

Ressalte-se que no contexto do efetivo desempenho de uma peça cerâmica, a “verdadeira” EPU é irreversível, dado o fenômeno da histerese e dada a ordem de grandeza da temperatura de requeima necessária à sua remoção.

Para a determinação da EPU “atual” são relacionados abaixo os extratos dos textos de algumas das Normas consultadas:

- Norma ISO 10545-10 (1995):

As amostras devem ser requeimadas em mufla a uma temperatura de 550°C durante 2 horas.

Norma BS 6431 – Part 21 (BS, 1984):

As amostras devem ser requeimadas em mufla a uma temperatura de 600°C durante 4 horas.

Norma NBR 13818 (1999):

As amostras devem ser requeimadas em mufla a uma temperatura de 550°C durante 2 horas.

Bowman e Westgate (1994), ao analisarem a EPU de uma terracota australiana que com 7,3% de absorção de água apresentou destacamento, verificaram que para temperaturas de requeima entre 500 e 600°C, o aumento das respectivas EPUs foi de 5%, o que evidencia desprezíveis manifestações da inversão do quartzo e da alteração da cinética dos corpos-de-prova (2005).

Menezes et al. (2005), ao analisarem as características de quatro amostras de revestimento cerâmico, concluíram que estas, quando submetidas às temperaturas de requeima de 550, 575 e 600 °C, não apresentaram diferenças significativas da EPU “atual”, conforme pode ser constatado pelos valores apresentados pelos referidos pesquisadores na Tabela 2.1

Tabela 2.1 Resultados da EPU “atual” de amostras de revestimento cerâmico obtidos a diferentes temperaturas de requeima (Menezes, Campos e Ferreira -2005-)

Amostra analisada	Temperatura de requeima	EPU “atual” (%)
A	550°C	0,080
A	575°C	0,082
A	600°C	0,074
B	550°C	0,114
B	575°C	0,108
B	600°C	0,102
C	550°C	0,048
C	575°C	0,048
C	600°C	0,048
D	550°C	0,151
D	575°C	0,158
D	600°C	0,151

Baseados nos dados da Tabela 2.1. Menezes, Campos e Ferreira (2006), de uma forma conclusiva, afirmam que os resultados nela apresentados estão de acordo com a literatura técnica, segundo a qual a granulometria das matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica é suficientemente fina para evitar a inversão do quartzo a temperaturas abaixo de 600°C.

Ressalte-se, no entanto, que, no contexto do efetivo desempenho de uma peça cerâmica, a EPU é irreversível, já que a ordem de grandeza das temperaturas de requieima necessárias à sua remoção está muito acima da ordem de grandeza das temperaturas a que, em efetivas condições de serviço, estará submetido qualquer material de construção.

2.6.5.2 Análise e determinação da EPU “potencial” (ou EPU “total”)

Sabe-se que a EPU é um processo lento e insidioso, o que em muito agrava os seus efeitos em obras de engenharia civil, e, nesse sentido, confirmando a literatura técnica concernente a tal assunto, a Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG – UAEMA-, nas suas diversas investigações voltadas ao diagnóstico de uma série de desabamentos ocorridos na Região Metropolitana da Cidade do Recife, investigações essas hoje consideradas emblemáticas para o estudo da EPU, constatou que o tempo de construção dos prédios avariados ultrapassava os vinte anos.

É necessário, pois, diante do necessário conhecimento do efeito a longo prazo da EPU, que procedimentos laboratoriais simulem a EPU que ocorrerá até o término do período da vida útil preconizada para o corpo cerâmico a ser utilizado na obra e, para tal, podem ser adotadas metodologias que “prevejam” a sua intensidade, destacando-se, dentre os mesmos, o método da imersão em água, o método da fervura e o método da autoclavagem.

Campos (2002), na sua dissertação de mestrado, adotou os três métodos acima referidos, seguindo os seguintes parâmetros:

para a imersão em água, os corpos-de-prova ficaram imersos em água destilada durante os períodos de 30, 60 e 90 dias:

para a fervura, os corpos-de-prova foram tratados em água fervente durante os períodos de 8, 10 e 24 h, e foram mantidos separados para que fosse eliminada a possibilidade de desgaste por atrito entre eles;

para a autoclavagem, os corpos-de-prova foram submetidos a uma pressão de 0,7 MPa (100 psi) por períodos de 2 e 5 h, à temperatura de 161°C.

Menezes et al (2005) correlacionaram resultados da EPU “potencial”, por eles obtidos, com dados da literatura técnica e, daí, admitiram que a expansão resultante da imersão por 90 dias seria aproximadamente equivalente à EPU natural de 1 ano (...), e que a EPU obtida após autoclavagem por 4 horas, sob a ação da pressão de 0,7 MPa e temperatura de 161°C seria aproximadamente igual à EPU natural verificada após 30 anos de exposição às condições do meio-ambiente.

Cole (1961), plotando a expansão natural versus o logaritmo do tempo, obteve uma relação linear na faixa de temperatura de 800-1200°C, e uma relação linear da expansão obtida em autoclavagem e o logaritmo do tempo na faixa de temperatura de 1000-1150°C, ao longo de um outro intervalo, portanto.

Bauer e Rago (2000), afirmam que o processo de aceleração por fervura tem a sua representatividade discutida, já que as condições prescritas para o referido ensaio não reproduzem o verdadeiro valor da EPU “potencial” e, a propósito, Campos (2002) observou que valores de EPU obtidos por fervura em 24h são de duas a três vezes inferiores aos valores de EPU obtidos por autoclavagem ao longo de 5h (0,7 MPa, 161°C).

2.6.5.3 Análise e determinação da EPU “futura”

Numericamente, determina-se a EPU “futura” subtraindo-se, da EPU “potencial”, o valor da EPU “atual”, estendendo-se, portanto, à primeira, todas as considerações já apresentadas nos itens relativas às duas últimas.

Em relação ao seu significado, pode-se afirmar que a EPU “futura” é a que representa um conceito mais elaborado, já que ela representa o quanto, de fato, se expandirá sob efeito da ação deletéria da umidade ao longo do tempo em que, efetivamente, estiver a peça cerâmica “trabalhando”.

Neste sentido, deve-se ter em mente que, através do conhecimento da EPU “futura”, pode-se descartar a ação degenerativa das tensões internas originadas pelo aumento de dimensões da peça cerâmica desde a sua fabricação até o momento da sua aplicação, admitindo-se, é óbvio, que seja este o momento de referência para o cálculo da EPU “atual” a ser tomado como referência.

Raposo (2003) indica que a EPU “verdadeira” não está efetivamente reproduzida através dos processos da fervura e da autoclavagem, pois a severidade imposta através de tais processos impõem elevadas temperatura e pressão, o que, além de provocar a desejada agilização dos mecanismos da procurada EPU, desencadeiam, como efeito colateral, o incremento da energia necessária a reações estranhas ao processo que se desenvolveria nas condições espontâneas do meio-ambiente.

CAPÍTULO 3

Reflexões acerca do tema da tese

3.1 Cerâmica vermelha: incertezas inerentes à matéria-prima e/ou decorrentes do processo de fabricação

Muitas das hesitações que envolvem o estudo da cerâmica tradicional são devidas à heterogeneidade de características das suas matérias-primas essenciais – as massas argilasas –, e aos diversos estágios resultantes da sua queima, ao longo de cada um dos quais se verifica, de uma forma aleatória, a fusão total ou parcial de minerais, o surgimento de fases vítreas, amorfas e cristalinas, ou mesmo a permanência de fases nelas existentes no estado natural.

De forma bastante sintomática, Bradstreet (1958) conceitua materiais cerâmicos como o produto do ramo da indústria em que minerais de composição inconstante e pureza duvidosa são expostos a temperaturas mal definidas, durante períodos de tempo que provocam, de forma incompleta, reações desconhecidas, formando produtos heterogêneos e não estequiométricos.

É verdade que neste labirinto de incertezas existe uma sólida base teórica para a elaboração de diagramas de equilíbrios que, no entanto, se mostram proibitivamente complexos à luz dos dados termodinâmicos atualmente disponíveis.

É, portanto, árdua a missão de se definirem modelos que prescrevam o comportamento de um produto cerâmico, o que é constatado através da elevada amplitude dos desvios dos resultados dos ensaios destinados à sua caracterização, e, neste contexto de tantas indefinições e complexidade, a análise científica tenta estabelecer as leis que possam reger as propriedades de tais produtos que, obtidos a partir de comportamentos tão diversos e imprevisíveis, estão cada vez mais inseridos no cotidiano da vida moderna. Como exemplo representativo desta inserção, está o retorno da cerâmica vermelha empregada segundo a concepção de alvenaria estrutural, fato que, ao dar cumprimento à tendência cada vez mais voltada à economia de recursos, acabou por evidenciar algo que, apesar de tornar a alvenaria cerâmica estrutural extremamente vulnerável, manteve-se durante muito tempo camuflado: a EPU.

É também verdade que pesquisas de cunho eminentemente científico já estabeleceram alguns dos preceitos que, comprovadamente, interferem na ocorrência de tal

fenômeno expansivo, chegando-se, neste sentido, a formular modelos bem representativos voltados tanto à ação da água adsorvida quanto à interferência de fases vítreas e/ou amorfas. Dessa forma, já se vislumbra, para um futuro que se deseja não muito distante, o domínio efetivo da EPU, cujo desconhecimento pleno tanto custou sob a forma de lamentáveis perdas de vidas humanas e materiais.

Contraopondo-se ao empenho de núcleos de pesquisa, a abundância da matéria-prima da cerâmica vermelha e a sua conseqüente obtenção a custos atrativos, favorecem a proliferação de “indústrias” que, destinadas à fabricação de materiais empregados na construção civil, encontram-se totalmente dissociadas de rudimentos já consagrados pela tecnologia científica e, dessa forma, atraídos pela facilidade de instalação e pelo lucro praticamente certo, muitos curiosos se insinuam na sua cadeia produtiva, tornando-se o perigoso binômio -lucro fácil x empirismo- o combustível que possibilita a sobrevivência daqueles que, via de regra, sem condições técnicas efetivas, colocam no mercado o bloco cerâmico destinado a cumprir a solicitação da alvenaria estrutural sem que para tanto apresente ele as características exigidas.

Se inúmeros fenômenos relativos à cerâmica vermelha, bem como muitos dos seus significativos efeitos, são de difícil detecção em acreditados centros de pesquisa, o que não se pode imaginar em relação à legião de mal iniciados que, envolvidos com a fabricação e comercialização dos blocos cerâmicos destinados à alvenaria estrutural, muito mais preocupado estão com o lucro do seu empreendimento do que com as implicações técnico-científicas nele envolvidos.

Destaque-se, também, que na sua formação profissional, os engenheiros-civis e os arquitetos, os profissionais que mais se integram ao processo da construção civil, têm o estudo dos materiais voltado quase que exclusivamente à análise dos aspectos macros, tais como alteração de resistência mecânica devida à variação da mistura de matérias-primas, e/ou à variação da forma e dimensões das peças acabadas. A durabilidade dos blocos cerâmicos, por exemplo, fenômeno importantíssimo e de grau de complexidade inferior ao da EPU, só muito recentemente tem se constituído em rotina de análise entre aqueles referidos profissionais.

Diante de tal cenário, não chega a causar admiração que a EPU, fenômeno sutil com implicações de ordem microscópica, passe ao largo da preocupação do contingente envolvido com a construção civil -fabricantes de blocos, calculistas e construtores- isto

devendo-se não somente à negligência de alguns industriais da cerâmica vermelha, como também, e principalmente, à formação de engenheiros civis e arquitetos, pouco comprometida com os fenômenos inerentes à ciência dos materiais, conforme já comentado nestas reflexões.

O resultado de tal combinação de fatos tão desfavoráveis se torna evidente diante da periodicidade com que se verifica o desmoronamento, na Região Metropolitana do Recife, de edificações em alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, o que já se tornou emblemático como a comprovação da necessidade de pesquisas intensas e urgentes para o inteiro domínio, dentre outros fenômenos, da EPU.

Diante de tudo o que foi exposto e comentado neste item, conclui-se que, como normalmente ocorre na escolha de qualquer novo sistema, fazem-se necessários o acompanhamento de desempenho da sua aplicação e pesquisas relacionadas com todas as implicações nele envolvidas.

É raro que um sistema traga consigo todas as vantagens, ou seja desprovido de todas.

Muito provável é, no entanto, que, no confronto entre a alvenaria estrutural e o concreto armado, casos haverá em que aspectos positivos de um método superarão os do outro, e vive-versa.

3.2 Considerações interpretativas relativas a alguns ensaios prescritos

Admitindo que a argila apresente uma redução gradual do seu teor de umidade, os critérios estabelecidos por Atterberg definem o limite de liquidez como o teor de umidade correspondente à transição do seu estado líquido para o estado plástico, e o limite de plasticidade como o teor de umidade correspondente à transição do seu estado plástico para o seu estado semi-sólido.

De aplicação prática mais importante do que os limites de plasticidade (LP) e de liquidez (LL), é, no entanto, o denominado índice de plasticidade (IP) que, obtido a partir dos dois referidos parâmetros de Atterberg, indica a amplitude de umidades ao longo das quais a argila evidencia a sua propriedade plástica, ou seja, a amplitude de umidades ao longo das quais a argila está apta a ser extrudada.

A distribuição granulométrica da argila exerce influência decisiva nas características dos produtos cerâmicos, e Acchar (2006), enfaticamente, ressalta este fato através do diagrama ternário indicado na Figura 3.1, o qual apresenta quatro regiões distintas: a região 1 do diagrama é relativa à confecção de cerâmica com paredes finas (tijolos furados aí incluídos), enquanto as regiões 2 e 3 são as mais indicadas para a produção de telhas e tijolos com furos com furos perpendiculares às faces de assentamento. Já a distribuição granulométrica da região 4 se mostra mais adequada à fabricação de tijolos maciços.

Caputo (2000), a partir da definição de um parâmetro genericamente representado por D_n , no qual estão indicados os n% de partículas de um solo com “diâmetros” inferiores ao valor “D”, admite os indicadores $C_u = D_{60} / D_{10}$, e $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$, respectivamente denominados coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura.

Quanto aos referidos parâmetros C_u e C_c , Caputo (2000) admite o solo classificado como:

- de granulometria muito uniforme $\rightarrow C_u < 5$;
- de granulometria de uniformidade média $\rightarrow 5 < C_u < 15$;
- de granulometria desuniforme $\rightarrow C_u > 15$;
- bem graduado $\rightarrow C_c$ entre 1 e 3.

Vargas (1978) ensina que o conhecimento da granulometria e da correlação entre o IP e o LL permitem que se prevejam, com certa aproximação, todas as propriedades da argila, razão pela qual é, a partir de tais parâmetros, que se baseiam alguns dos seus mais recorridos critérios de classificação.

Neste trabalho, para a separação da fração a ser submetida aos ensaios relativos aos limites de Atterberg, foi substituída a peneira nº 40, indicada nas normas de referência, pela peneira nº 80, com o que se reconstituíram as condições de preparação das massas extrudadas.

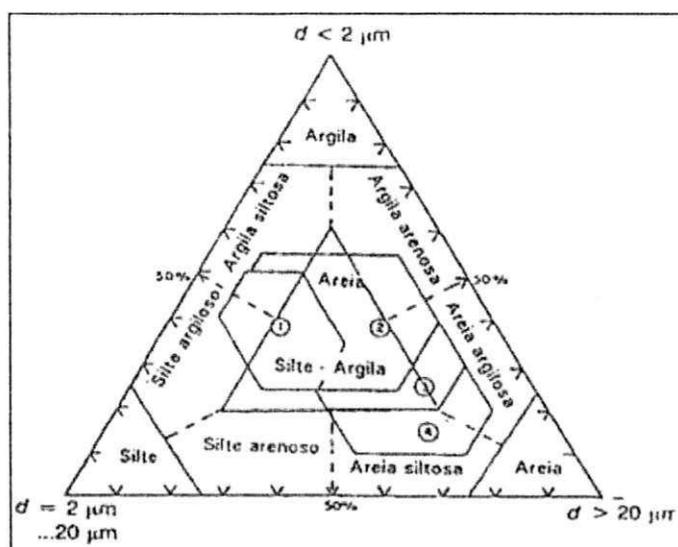


Figura 3.1 Áreas de distribuição granulométrica para produtos cerâmicos argilosos
(Acchar, 2006)

Ainda a propósito da análise química, COLE e BANKS (1991) admitiram a possibilidade da influência do quartzo livre na intensidade da EPU e, para a avaliação do teor de tal mineral, consideraram a relação:

$$\% \text{Quartzo livre} = \% \text{Si} - 1,24 (\% \text{Al}_2\text{O}_3)$$

Acchar (2006) destaca que as análises térmicas são referência fundamental no estudo de materiais cerâmicos, visto que fornecem informações essenciais sobre o comportamento das suas matérias-primas ao longo de uma etapa fundamental da sua fabricação: a cessão gradual de calor.

Os ensaios térmicos, prossegue o autor, podem ser realizados tanto ao ar livre como em atmosfera controlada, e dentre os fenômenos físicos e químicos identificáveis, podem ser citadas: a fusão, a cristalização, a mudança de fase, as reações de oxidação e redução e as reações no estado sólido.

Concluindo, lembra que as análises térmicas são classificadas nos quatro principais grupos:

- os dependentes da variação de peso (termogravimetria);
- os dependentes da variação de energia (DTA, calorimetria diferencial, DTA derivativa);
- os dependentes de variações de dimensão (dilatometria);
- os dependentes da evolução de voláteis (análise de gás liberado)

Durante o aquecimento de uma argila, dão-se transformações ora exotérmicas, ora endotérmicas. A amplitude dos picos de absorção ou liberação de calor, registrados durante uma análise térmica diferencial, bem como a determinação das temperaturas em que elas ocorrem, servem para a sua identificação.

Nas caulínicas, o pico endotérmico aparece entre 500 e 600°C, faixa ao longo da qual ocorre a perda da água de constituição; próximo aos 900°C aparece o pico exotérmico, que indica a fase de recristalização.

As argilas montmoriloníticas (esmetíticas) são, por sua vez, caracterizadas por forte absorção de calor a baixa temperatura, em consequência da elevada capacidade de retenção de água, sucedendo-se vários picos endotérmicos de menor intensidade, sendo que aos 700°C há perda de água de constituição e, aos 900°C, dá-se o início da liberação de calor.

Na análise das argilas micáceas, verificam-se, em geral, três picos endotérmicos, correspondentes à perda da água zeolítica e da água de constituição, e o último, menor do que os dois precedentes, entre 800 e 900°C, devido à destruição da estrutura interna: nestas argilas não ocorrem efeitos exotérmicos apreciáveis (PETRUCCI, 1975).

Mothé e Azevedo (2002) ressaltam que a análise térmica diferencial é uma técnica através da qual se mede a diferença de temperatura entre a amostra e uma substância inerte (referência), quando ambas são submetidas ao aquecimento ou ao resfriamento, e que mudanças da temperatura da amostra são ocasionadas pelas transições ou reações entálpicas devidas a mudanças de fase, fusão, inversões da estrutura cristalina, sublimação, vaporização, reações de desidratação, reações de dissociação ou decomposição, oxidação, reações de redução e outras reações químicas.

Concluindo, ainda lembram que, geralmente, transições de fase, desidratações, reduções e algumas reações de decomposição produzem efeitos endotérmicos, enquanto cristalização, oxidação e outras reações de decomposição produzem efeitos exotérmicos.

As citadas autoras ainda recordam que a análise termogravimétrica baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função do tempo ou da temperatura. Em outras palavras, concluem, a TG pode ser definida como um processo contínuo que mede a variação de massa (perda ou ganho) de uma substância ou material como uma função da temperatura e/ou tempo.

A análise térmica diferencial (DTA), segundo a metodologia proposta por Souza Santos (1992), consiste no aquecimento simultâneo da amostra na forma pulverulenta e de um padrão inerte, a uma taxa de variação de $12,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, desde a temperatura ambiente até 1000°C e o registro, ao longo de tal intervalo, das transformações endo e exotérmicas.

A análise termogravimétrica (TG), também segundo Souza Santos (1992), se dá através do mesmo procedimento prescrito para a determinação da DTA, devendo-se no presente caso, ao longo do intervalo de variação de temperatura, registrar a perda gradual de massa do protótipo analisado.

É importante que se diferencie, de uma forma bem explícita, os parâmetros de caracterização dos corpos-de-prova porosidade da absorção de água. A primeira está associada à quantidade total de vazios (os vazios permeáveis somados aos vazios impermeáveis), e a absorção é medida pela quantidade exclusiva de vazios permeáveis, aqueles que, por hipótese, estão em conexão com o meio exterior.

Conceituações análogas ocorrem quando se diferencia a massa específica da massa específica aparente, pois, na determinação do volume a ser considerado para o cálculo da massa específica são “eliminados” os vazios permeáveis e os vazios impermeáveis, e, para o cálculo da massa específica aparente, consideram-se os vazios impermeáveis.

Recorde-se que, quando da “eliminação” dos vazios permeáveis, é freqüente o emprego do picnômetro.

O ensaio de difração de Raios X permite a identificação e quantificação de fases cristalinas e, a propósito, Acchar (2006) lembra que ele não é indicado para materiais semicristalinos ou que não possuam estrutura cristalina definida, já que esta análise não se capacita à identificação de fases amorfas.

Para a determinação da difração de Raios X (DRX), faz-se emprego de um difratômetro em cujo interior o feixe dos referidos raios atinge a superfície do espécime e, após difratado, é detectado por um contador que se move a uma velocidade constante em um arco de círculo cujo centro coincide com o centro do referido espécime. O contador registra graficamente, em posição e intensidade, os ângulos e as difrações correspondentes. Cada ângulo, definido em função do metal alvo conhecido, é indicado no papel registrador e, através do enunciado da lei de Bragg, definem-se as distâncias interplanares que caracterizam o material cristalino representado pelo espécime.

Em relação ao emprego do autoclave, equipamento bastante difundido para que, de forma acelerada, se verifique a EPU, Schurecht e Pole (1930) admitiram que a expansão devida à ação do referido aparato era o resultado da absorção de água no interior do corpo-de-prova e não o resultado das elevadas temperaturas e pressões resultantes, e Mellor (1937), por outro lado, coloca dúvidas sobre a autoclavagem como método efetivo de investigação da EPU pelo fato de tal método sobrepor dois fatores: a elevada temperatura e a elevada pressão, das quais resultam, segundo este pesquisador, valores de expansão que, quando confrontados com aqueles que ocorreriam em condições espontâneas de uso, estariam sempre superestimados.

A representatividade da autoclavagem como simulação acelerada do processo de desgaste já foi, no entanto, colocada à prova ao longo das décadas que se sucederam às análises de Schurecht e Pole (1930), e Mellor (1937), e se bem que seja verdadeiro que tal metodologia superestima a ação deletéria das intempéries, menos verdadeiro não é que ele se torna um poderoso processo para evidenciar a ação transformadora das adições feitas às massas empregadas na confecção de corpos cerâmicos.

Considerando, por outro lado, que o objetivo essencial deste trabalho não é a mensuração absoluta da ação do autoclave, julgou-se conveniente o emprego de tal equipamento sob a ação da pressão de 160 Psi (1,12 MPa), à temperatura de 180°C, e durante 5h, condições efetivamente severas através das quais se pretende ressaltar a influência dos carbonatos empregados como adições das massas destinadas à confecção das amostras cerâmicas, e, dessa maneira, simular a ação da EPU ao longo de um longo período estimado em 35 anos, ao longo dos quais vem ocorrendo o estágio crítico da resistência dos blocos cerâmicos dos prédios tipo caixão construídos na Região Metropolitana do Recife.

A dilatométrica consiste basicamente em medir as variações dimensionais de um corpo-de-prova aquecido a uma taxa de incremento de temperatura estabelecida. Os equipamentos destinados a tal verificação são denominados "dilatômetros", dos quais existem vários tipos, sendo o mais simples deles constituído de um tubo de sílica ou alumina, em cujo interior se coloca a amostra que permanece em contato com uma vareta do mesmo material do tubo. Esta vareta é concebida para absorver e transmitir, sob forma de diferenças captadas do potencial elétrico de um transdutor, as variações dimensionais ocorridas na amostra.

Esta análise é bastante empregada tanto na seleção de matérias-primas como na análise do comportamento de produtos conformados, prestando-se para o estudo da sinterização, da formação da fase líquida, da fluência e das reações e transformações do estado sólido. Também complementa as informações obtidas pelas análises DTA e TG, fornecendo informações importantes que envolvem variações de dimensões (ACCHAR, 2006).

Como condição padrão de referência, os corpos-de-prova destinados às diversas fases das pesquisas referentes a esta tese são previamente submetidos ao estado de saturação plena.

3.3 A “EPU” ainda a caminho do entendimento pleno

Depreende-se, pelo que já foi objeto de análise ao longo deste trabalho, que, apesar das fortes evidências de comprovação dos estudos teóricos de Smith (1955) e outros pesquisadores, sabe-se que a EPU apresenta um maior grau de complexidade quando ocorre nos materiais cerâmicos, pois estes contêm silicatos anidros que, ao se combinarem com a água (líquida ou na forma de vapor), geram, de forma indefinida, o aumento das dimensões da peça cerâmica, numa razão inconstante e dependente das fases cristalinas, amorfas e vítreas previamente existentes ou a se formar com o decorrer do tempo.

Dito de outra maneira, o estudo da EPU ainda se encontra no plano investigatório quando se tenta estabelecer as leis que possam correlacionar tantos e tão diversos parâmetros.

Assim sendo, ao altíssimo grau de empirismo que envolve o projeto de uma alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, deve-se aliar a sua alta vulnerabilidade diante dos efeitos da ocorrência da EPU.

Comprovando que, de fato, muito distante ainda se encontra o pleno entendimento da EPU dos blocos cerâmicos, são dignos de menção alguns tópicos do laudo técnico apresentado pela ATECEL, empresa de consultoria agregada à Universidade Federal de Campina Grande (um dos locais de pesquisas de ponta do referido fenômeno).

O referido laudo técnico refere-se ao desabamento do Bloco “B” do Conjunto Residencial Enseada de Serrambi, localizado na cidade de Olinda, na Região Metropolitana do Recife, que, em vinte e sete de dezembro de 1999 ruiu, deixando atrás de

tal ocorrência um rastro de muitas perdas humanas e materiais. Isto posto, lê-se no referido parecer:

Com respeito à EPU total obtida por fervura e autoclavagem têm-se valores de 0,73 mm/m e 1,18 mm/m, respectivamente, não se observando, como citado na literatura, que a EPU por autoclavagem é aproximadamente o dobro da EPU por fervura.

Com respeito à EPU futura, temos dados que apresentam grandes discrepâncias, pois através do ensaio de fervura obtemos uma EPU negativa (- 0,15 mm/m) e, através do ensaio da autoclavagem teremos ainda uma EPU futura de 0,30 mm/m.

Esta situação, nos diz o referido documento emitido pela ATECEL, evidencia que o estágio de conhecimento sobre este problema ainda é insuficiente, persistindo as dúvidas mencionadas na literatura em relação aos métodos de ensaio, na qual se menciona que o adequado seria o ensaio de fervura, e que o ensaio de autoclavagem conduziria a dados superestimados. Em outro trecho do referido laudo técnico ainda se lê:

A tensão de ruptura à flexão após fervura e após autoclavagem apresenta valores superiores aos obtidos com a amostra seca ao ar e autoclavada, o que contraria as informações existentes na literatura.

Miranda (2001), ao analisar o desabamento do Edifício Aquarela (fato ocorrido em 1997), imóvel este localizado em Jaboatão dos Guararapes, na Região Metropolitana do Recife, demonstra incertezas em relação à representatividade dos métodos atualmente vigentes para a avaliação da EPU, conforme se depreende de um dos itens das suas conclusões, através do qual ele admitiu que o “colapso estrutural daquele edifício teve como uma das causas principais a expansão por umidade juntamente com erros de execução da obra”

Submetida a uma análise crítica, tal afirmação possibilita os dois questionamentos propostos abaixo, os quais, não esclarecidos, dão o caráter de indefinição ao desfecho do estudo. Assim sendo, indaga-se,

1º) em relação a “**uma das causas principais**”, quais foram as outras causas principais ?

2º) em relação a “**juntamente com erros de execução**”, que erros de execução ? , e qual a participação de tais erros de construção no âmbito do desastre ?

A partir dos grifos que demos a três palavras-chaves do extrato do parecer do referido pesquisador, acima indicadas, percebe-se a sua extrema cautela ao atribuir à EPU uma causa apenas genérica do sinistro estudado, o que se entende como consequência do pouco conhecimento que envolve tal fenômeno, devendo-se, por isso mesmo, destacar a importância de que se reveste a referida dissertação de Mestrado, a qual, dado o seu pioneirismo, torna-se uma importante obra de referência.

Conforme já comentado, a cautela que se verifica na conclusão da dissertação de Miranda (2001) deve-se, tudo indica, à pouca confiabilidade que pode ser imputada a algumas medições da EPU e, em tal sentido, ele relata ter verificado expansões futuras negativas, incoerentes, portanto, com a natureza do problema, e, textualmente, afirma :

“Praticamente todos os corpos-de-prova apresentaram pequenas fissuras após os tratamentos de expansão, e então todos os resultados deverão ser vistos com muito cuidado; como, por exemplo, o caso dos corpos-de-prova ficarem menores do que seu tamanho original após o tratamento, o que foi devido à desagregação do corpo-de-prova, mas também pode ter sido devido a uma imprecisão do aparato medidor, bem como do manuseio deste equipamento.”

Prosseguindo, eis o que, a propósito, ainda diz Miranda (2001):

“Uma fonte de erro que provavelmente ocorreu foi devido às desigualdades dos corpos-de-prova, já que estes não eram regulares, devido ao processo de serragem que sofreram e da própria natureza dos tijolos, já que todos eles estavam fora da norma quanto ao comprimento, largura e espessura. Tanto no tijolo, como um todo, como nas peças serradas onde podemos encontrar corpos-de-prova de 0,4 até 0,9 mm de espessura.”

“Outro fator gerador de erros é que durante a serragem, pode ter ocorrido a geração de tensões internas que modifiquem as características do corpo-de-prova.”.

CAPÍTULO 4

Materiais e métodos

4.1 Matérias-primas cruas: tipos, tratamento e prescrições

Os estudos ora apresentados se basearam na análise de protótipos cerâmicos moldados em laboratório com o emprego das massas argilosas provenientes de duas empresas fabricantes de blocos – a Cerâmica “A” e a Cerâmica “B”-, cujos produtos satisfaziam as exigências das normas NBR 6461 (1983) e NBR 8947 (1985), em vigor quando da coleta das referidas matérias-primas.

Considerou-se que os reduzidíssimos teores dos álcalis (Na_2O e K_2O) constituintes da massa argilosa da Cerâmica “B”, quando confrontados com os teores não tão reduzidos de álcalis da massa argilosa da Cerâmica “A”, poderiam ter se tornado em elementos de comparação de resultados.

4.1.1 Massas e adições utilizadas

Conforme já foi referido, as matérias-primas argilosas dos corpos-de-prova cerâmicos empregadas na confecção dos blocos moldados em laboratório provieram das Cerâmicas que neste trabalho serão designadas por “A e “B”: a primeira situada no estado da Paraíba, e a segunda situada na Região Metropolitana do Recife, estado de Pernambuco.

As referidas matérias-primas argilosas chegaram ao laboratório no seu estado bruto, e dada a grande coesão inerente a tais materiais, e em face do reduzido teor de umidade em que se apresentavam (umidade natural), fez-se necessário o seu tratamento prévio através da secagem, do destorroamento e do peneiramento, o que viabilizou a sua manipulação.

Os compostos utilizados como adições, o carbonato de cálcio e o hidroxicarbonato de magnésio, foram adquiridos no comércio especializado na venda de produtos laboratoriais, o que, dada a garantia da constância da sua composição química, implicou em grande confiabilidade quanto aos teores respectivos de óxido de cálcio e óxido de magnésio definidos a partir de cálculos estequiométricos; as análises térmicas posteriormente realizadas confirmaram tal expectativa.

As adições foram incorporados nos teores de 12,0% e 18,0% (carbonato de cálcio), e 16,3% e 24,6% (hidroxicarbonato de magnésio); estes valores geram efetivas adições de

6,7% e 10,1% de óxidos de cálcio e de magnésio após o desprendimento do CO₂ formador dos dois referidos carbonatos.

O carbonato de cálcio e o hidroxicarbonato de magnésio, enquadrados como PA, foram da marca comercial Vetec.

4.1.2 Remoção da umidade natural

Na sua forma bruta, as amostras argilosas, até então “secas” ao ar, são colocadas em estufa a temperaturas entre 105 e 110°C, e, ao apresentarem constância de massa, evidenciaram a necessária perda da umidade de equilíbrio com o meio ambiente (SOUZA SANTOS, 1992).

4.1.3 Destorroamento

Visando à obtenção de um parâmetro de uniformidade para a comparação das propriedades das duas argilas utilizadas, fez-se emprego de um moinho tipo galga, através do qual as amostras foram destorroadas, por via seca, numa operação em que foi rompida a coesão que unia as suas partículas, sem, no entanto, fragmentá-las.

O tempo necessário à referida operação variou entre 20 e 25 min, devido ao poder coesivo diferenciado de cada amostra trabalhada.

4.1.4 Peneiramento

Das amostras secas e destorroadas, foi coletada a fração que passava na peneira ABNT nº 80, a qual viria ser utilizada na moldagem dos protótipos destinados aos ensaios cerâmicos e EPU, bem como a alguns ensaios de caracterização das argilas, posteriormente abordados neste capítulo.

Uma vez tornadas “trabalháveis”, as massas argilosas foram submetidas a uma série de ensaios de caracterização, abaixo discriminados, através dos quais se tornou possível detectar muitas das suas propriedades micro e macroscópicas que, posteriormente analisadas, foram associadas a procedimentos e interpretações de resultados obtidos.

- análise química
- análise granulométrica;

- análise de plasticidade;
- análise térmica diferencial (DTA);
- análise térmica gravimétrica (TG);
- análise difratométrica (DTX).

4.1.5 Determinação da análise química

O teor dos óxidos cujas reações durante o processo da queima interferem nas características de um produto cerâmico, foi determinado segundo técnicas clássicas indicadas por Santini e Moro (1967), citadas e ratificadas por Souza Santos (1989), e de acordo com as normas do Laboratório de análises minerais do CCT/PRA/UFCG, local da referida análise.

4.1.6 Determinação da análise granulométrica

O método para a verificação da variação das dimensões das partículas constituintes da amostra se baseou no fato de o ângulo de difração de um feixe de raios “laser”, ao incidir sobre uma partícula, ser inversamente proporcional ao seu tamanho. No método ora comentado, o material analisado é diluído em um líquido (água ou álcool etílico) que, ao passar através de uma célula sobre a qual se faz incidir um feixe de raio “laser”, estimula detectores que captam os raios difratados que foram desviados pelas suas partículas em suspensão, o que possibilita a determinação do ângulo de difração e, por conseguinte, o “diâmetro” das partículas.

A análise granulométrica por difração a “laser” utiliza, portanto, a dispersão de partículas em fase líquida associada a um processo de medida óptica; combina-se a relação proporcional entre a difração a “laser” e a concentração e tamanho das partículas.

Nesta pesquisa, as frações passantes na peneira ABNT n° 200 foram dispersas em 250 ml de água destilada, em agitador à velocidade de 1700 rpm, durante 10 min, e o resultado desta operação foi colocado em equipamento modelo 1064 da CILAS, em modo úmido, até ser atingida a concentração “ideal”, que corresponde a 150 unidades de difração/área de incidência.

Esse método possibilita a determinação, de forma “confiável”, da distribuição granulométrica dentro do intervalo que vai de 0,1µm a 500µm (KIHARA et al, 2005)

4.1.7 Determinação da análise de plasticidade

Para a preparação dos blocos, necessário se faz o conhecimento da amplitude de umidades em que as massas podem assumir a forma desejada, e para tanto, neste estudo, foram elas submetidas à determinação dos “limites de Atterberg”, com o conhecimento dos quais se obteve o “índice de plasticidade” (IP); este parâmetro correspondente justamente à referida amplitude de umidades em que a massa pode ser moldada.

Os citados limites de Atterberg, a saber, o “limite de liquidez” (LL) e o “limite de plasticidade” (LP), foram determinados segundo as prescrições respectivas das normas ABNT 6459 (1984) e ABNT 7180 (1984), embora com o emprego da fração passante na peneira ABNT nº 80 e não da fração passante na peneira ABNT nº 40, orientação esta prescrita nestas duas citadas normas. Tal modificação se deveu à necessidade de uma maior representatividade daqueles limites, já que no tratamento prévio das massas tinha sido expurgada toda a fração retida na referida peneira ABNT nº 80.

O LL é conceituado como o teor de umidade acima do qual a massa não apresenta plasticidade, e o LP é conceituado como o teor de umidade abaixo do qual a massa também é desprovida de tal propriedade; o IP, a amplitude de umidades ao longo das quais a massa evidencia suas propriedades plásticas é, portanto, o intervalo das umidades compreendidas entre o LL e o LP ($IP = LL - LP$).

Recorrendo-se ao conceito de índice de consistência, já referido no item 2.5, é apresentada a Tabela 4.1 em que uma massa é classificada quanto ao seu IC relacionado com o respectivo estado de coesão.

Tabela 4.1 Classificação das massas quanto ao índice de consistência (Caputo 1988)

Índice de consistência (IC)	Estado de coesão
< 0	Muito mole
$0 < IC < 0,50$	Moles
$0,50 < IC < 0,75$	Médias
$0,75 < IC < 1,00$	Rijas
$IC > 1,00$	Duras

O IC relativo à obtenção do corpo cerâmico através da extrusão deve corresponder ao estado de “coesão média”, cujos intervalos indicados na Tabela 4.1 indicam valores de índice de consistência entre 0,50 e 0,75, conforme já referido no item 2.5.

4.1.8 Determinação da análise térmica diferencial (DTA)

Para a verificação dos eventos endo e exotérmicos foi empregada a metodologia proposta por Souza Santos (1992) e, para tanto, utiliza-se, neste estudo, o sistema de análises térmicas da BP Engenharia, modelo RB 3020, e como padrão de referência o coríndon [Al_2O_3 calcinado a $1200^\circ C$, passando na peneira ABNT nº 200 (0.075mm)].

4.1.9 Determinação da análise térmica gravimétrica (TG)

Para a verificação da perda ou ganho de massa em função da variação de temperatura também foi utilizada a metodologia proposta por Souza Santos (1992).

4.1.10 Determinação da análise difratométrica (DRX)

A detecção das fases cristalinas das amostras foi realizada com uma fração que, após fragmentada, passasse integralmente na peneira ABNT nº 200 e fosse submetida à incidência de Raios X os quais, após difratados e analisados segundo a metodologia proposta por Souza Santos (1992), definissem resultados posteriormente interpretados segundo os dados do International Center for Diffraction Data-ICPDS-, estes tomados como referência para a identificação dos cristais componentes de cada material estudado.

4.2 Blocos cerâmicos: obtenção e prescrições

A fase inicial deste estudo é realizada em dois estágios. No primeiro, os blocos são obtidos com o emprego das matérias-primas no seu estado natural, e, no segundo, com o emprego das matérias-primas modificadas através da incorporação de adições carbonáticas em diferentes teores. Tais adições, conforme já citado no item 4.1.1, foram incorporados nos teores de 12,0% e 18,0% (carbonato de cálcio), e 16,3% e 24,6% (hidroxicarbonato de magnésio); estes valores geram efetivas adições de 6,7% e 10,1% de óxidos de cálcio e de magnésio.

As amostras para o primeiro e para o segundo estágios foram moldadas através das seguintes etapas usuais no processamento cerâmico:

- moldagem,
- secagem e
- queima.

No fuxograma indicado através da Figura 4.1, estão indicadas as diversas etapas desenvolvidas ao longo dos trabalhos que viabilizaram a execução desta tese, bem como o seqüenciamento das atividades que, ao se integrarem, acabaram por conduzir aos objetivos almejados.

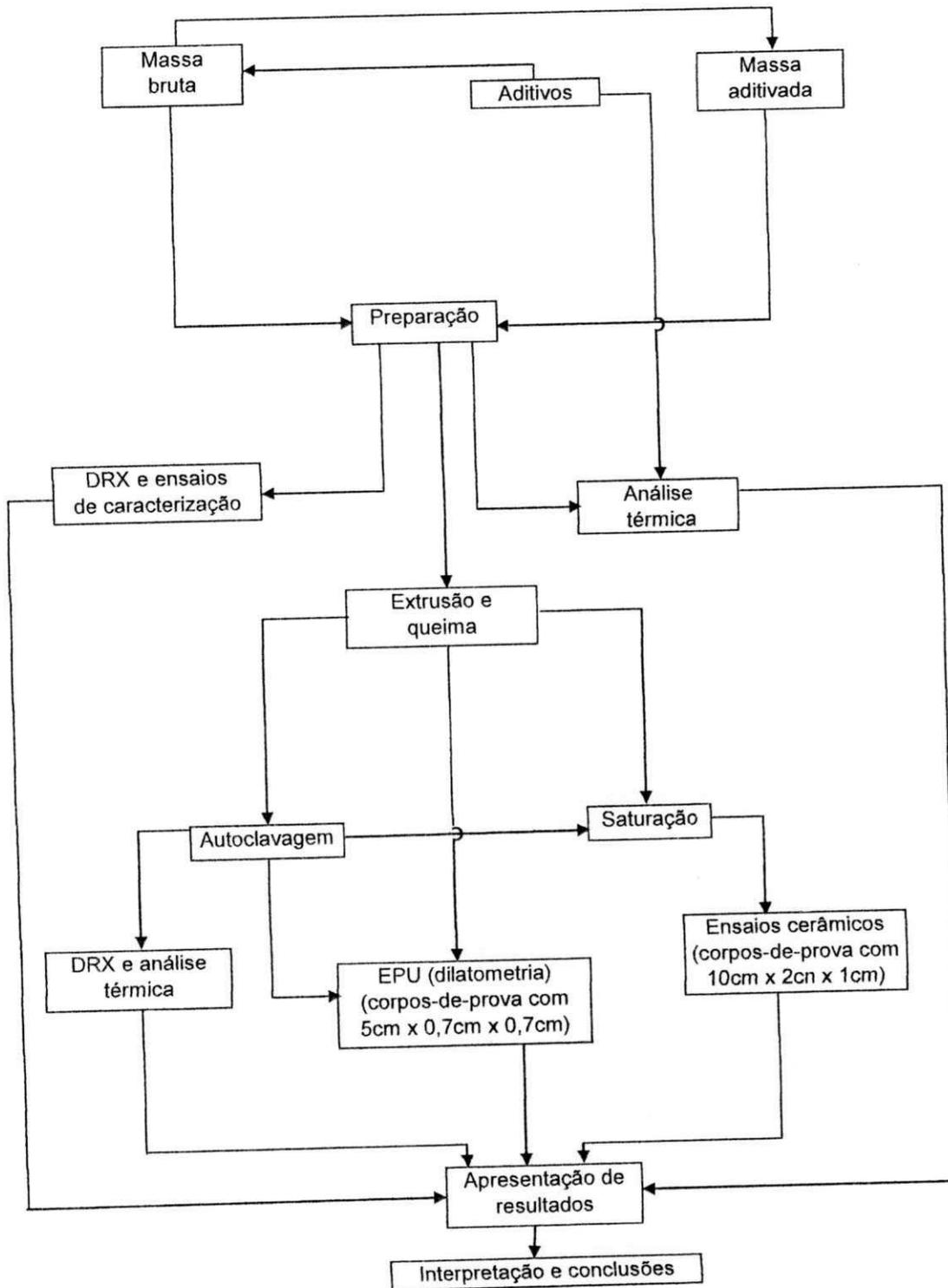


Figura 4.1- Fluxograma da metodologia adotada para a avaliação da EPU e das propriedades cerâmicas dos blocos moldadas em laboratório

4.2.1 Moldagem

A forma prismática dos corpos-de-prova foi obtida através da extrusão, método que consiste na passagem forçada da massa através de bocal apropriado (no presente caso a maromba de laboratório marca Verdes, modelo 51) de onde se extrai uma feira, uniforme e contínua, posteriormente seccionada no comprimento desejado para formar os protótipos laboratoriais. Os corpos-de-prova destinados à determinação das propriedades cerâmicas foram obtidos com as dimensões de 10cm x 2cm x 1cm (comprimento x largura x espessura), e aqueles destinados à determinação da EPU foram obtidos com as dimensões de 5 cm x 0,7 cm x 0,7 cm; todos foram moldados com a massa apresentando teores de umidade que geraram índices de consistência próximos a 0,75, compatíveis, portanto, com o método da extrusão utilizado. A amplitude das umidades, por outro lado, se encontrava dentro do intervalo de 20 a 35% estabelecido por Bauer (2001) como relativo ao estado “plástico consistente”, por ele também considerado como compatível com o referido método de extrusão.

A distribuição homogênea da água no interior da massa se deu através da maceração, para cuja efetivação aguardou-se um período de 72 h entre o término da operação de umedecimento e o início da moldagem propriamente dita.

4.2.2 Secagem

A remoção da água que permanece no interior dos corpos-de-prova após a etapa da moldagem se deu em dois estágios:

- com a sua permanência ao longo de 24 h em contato direto com o meio-ambiente,
- e
- com a sua permanência ao longo de 24 h no interior de estufa à temperatura variando entre 105 e 110°C.

4.2.3 Queima

As necessárias reações químicas para se obter o produto cerâmico propriamente dito ocorreram através da queima dos espécimes às temperaturas de 850, 900, 950 e 1000°C, para o que se utilizou o forno da marca Jung, em atmosfera oxidante, e velocidades de aquecimento com respectivas taxas de 1,7, 1,8, 1,9 e 2,0°C de aquecimento

por minuto. O tempo de aquecimento somado ao tempo de patamar completava o ciclo de queima considerado de 10 h.

Uma vez definidas as amostras, foram elas submetidas aos seguintes ensaios destinados à determinação das suas propriedades cerâmicas e EPU, parâmetros básicos para o estudo proposto nesta tese:

- índice de absorção de água;
- massa específica e porosidade aparentes
- envelhecimento acelerado (autoclavagem);
- tensão de ruptura à flexão (três pontos);
- expansão por umidade (com o emprego do dilatômetro);
- análises térmicas;
- análises difratométricas.

Os corpos-de-prova queimados e destinados aos ensaios de caracterização foram saturados e, dessa forma, reconstituiu-se uniformemente a eventual ação deletéria da água penetrante em seus vazios permeáveis.

4.2.4 Determinação do índice de absorção de água

A relação entre o volume de vazios permeáveis e a massa seca é avaliada a partir do volume da água necessária para preenchê-los, o que, neste estudo, é definido pelas indicações prescritas na NBR 15270-3 (2005) relativas ao índice de absorção de água.

4.2.5 Determinação da massa específica e da porosidade aparentes

A ME \tilde{A} (massa específica aparente) e a PA (porosidade aparente) foram determinadas através da associação entre a absorção de água, massa seca e massa dos corpos-de-prova submersos em água, estes últimos sujeitos, portanto, à influência do empuxo.

4.2.6 Simulação de envelhecimento acelerado

Para a simulação da ação das intempéries e das reações químicas que ocorrerão ao longo da vida útil prevista para o produto cerâmico representado pelos espécimes

estudados, é utilizada a autoclavagem, para cuja aplicação são consideradas as diretrizes gerais da NBR 13818 (1997).

Ao longo do referido procedimento, os corpos-de-prova foram submetidos à pressão de 1,12 MPa (160 psi), transmitida à temperatura de 180°C, durante 5h.

4.2.7 Determinação da tensão de ruptura à flexão

A verificação da máxima resistência à flexão suportada pela amostra apoiada em dois pontos (carregamento em três pontos) seguiu a metodologia proposta pela ASTM C 1161 (1994).

4.2.8 Determinação da EPU

A medição da deformação do corpo-de-prova decorrente da ação da água, neste estudo detectada depois da operação de requeima, seguiu as indicações das Normas ASTM C 370/1994 e, nesse sentido, fez-se emprego da “dilatometria”, cuja finalidade é a determinação das curvas de expansão térmica por aquecimento e resfriamento do material em estudo com o emprego de corpos-de-prova com dimensões aproximadas de 5 cm x 0,5 cm x 0,7 cm, colocados no interior de uma célula constituída por um cilindro de vidro acoplado a uma unidade medidora de deformações; os referidos corpos-de-prova, submetidos a uma elevação de temperatura à taxa de 10°C/min, ao terem atingido a temperatura de 600°C permaneceram em “stand by”, após o que foram gradativamente resfriados até a temperatura de equilíbrio com o meio ambiente. Dependendo do fim desejado, poderiam ser conduzidos à autoclave.

As curvas de deformação definidas em função da ação da temperatura, indicadas através de um computador acoplado ao sistema, correspondem à variação das dimensões dos comprimentos inicial e final do espécime analisado.

4.2.9 Determinação da análise térmica diferencial (DTA)

Para a verificação dos eventos endo e exotérmicos foi empregada a metodologia proposta por Souza Santos (1992) e, para tanto, conforme já analisado no item 4.18, utilizou-se, neste estudo, o sistema de análises térmicas da BP Engenharia, modelo RB

3020, e como padrão de referência o coríndon [Al_2O_3 calcinado a 1200°C , passando na peneira ABNT nº 200 (0.075mm)].

4.2.10 Determinação da análise térmica gravimétrica (TG)

Para a verificação da perda ou ganho de massa em função da variação de temperatura, conforme já analisado no item 4.1.9, também foi utilizada a metodologia proposta por Souza Santos (1992)

4.2.11 Determinação da análise difratométrica (DRX)

A detecção das fases cristalinas das amostras, conforme já analisado no item 4.1.10, foi realizada com uma fração que, após fragmentada, passasse integralmente na peneira ABNT nº 200 e fosse submetida à incidência de Raios X os quais, após difratados e analisados segundo a metodologia proposta por Souza Santos (1992), definissem resultados posteriormente interpretados segundo os dados do International Center for Diffraction Data-ICPDS-, estes tomados como referência para a identificação dos cristais componentes de cada material estudado.

CAPÍTULO 5

Resultados e discussão

5.1 Matérias-primas cruas: caracterização e considerações interpretativas

Através dos procedimentos laboratoriais indicados neste item, foram determinadas algumas das características macro e microscópicas das massas “A” e “B”, as quais, pelo entendimento da literatura específica, prestam-se como elementos de referência para a análise das propriedades cerâmicas e EPU dos blocos cerâmicos.

5.1.1 Análise química das massas “A” e “B”

A composição química da massa de cada uma das Cerâmicas “A” e “B” está apresentada na Tabela 5.1, através de cujos resultados é possível, com o emprego do conceito da “análise racional” definida por Ries (1928) (in Souza Santos 1992), se estabelecerem os seus teores aproximados das frações argila, quartzo e feldspato, os quais estão indicados na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 Composição química das massas utilizadas desconsiderando a perda ao rubro

Determinações	Massa “A”	Massa “B”
Resíduo insolúvel (RI) (%)	4,10	1,94
Óxido de silício (SiO_2) (%)	68,18	65,34
Óxido de alumínio (Al_2O_3) (%)	18,80	27,34
Óxido de ferro (Fe_2O_3) (%)	6,14	5,23
Óxido de cálcio (CaO) (%)	Traços	Traços
Óxido de magnésio (MgO) (%)	1,07	Traços
Óxido de sódio (Na_2O) (%)	0,72	0,06
Óxido de potássio (K_2O) (%)	0,99	0,09

Tabela 5.2 Análise racional das massas das Cerâmicas “A” e “B”

Amostra da Cerâmica	Substância argilosa	Feldspato	Quartzo
“A”	47,2%	12,0%	40,8%
“B”	66,4%	1,0%	32,6%

Estudos empreendidos por Holsher (1931) e Thiemecke (1941), e citados por Campos (2002), afirmam que os aumentos mais acentuados de dimensões dos corpos

cerâmicos devidos à EPU ocorrem em corpos obtidos com matérias-primas mais ricas em feldspatos, o que, neste estudo, observou-se até a temperatura de queima próxima dos 925°C para amostras autoclavadas, e próxima dos 970°C para amostras não autoclavadas; a propósito deste assunto, há considerações mais detalhadas no item 5.3.1.

Souza Santos (1992) indica resultados da análise química de vinte e quatro massas por ele classificadas como matérias-primas utilizáveis em cerâmica vermelha, em que as amplitudes dos teores dos seus óxidos componentes apresentam os limites de valores indicados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Amplitude de teores de óxidos componentes de vinte e quatro massas consideradas como matérias-primas de cerâmica vermelha (Souza Santos, 1992)

Óxidos componentes	Amplitude da percentagem de valores detectados
S_iO_2	de 43,2 a 77,6%;
Al_2O_3	de 9,9 a 38,0%;
Fe_2O_3	de 1,4 a 9,6%;
CaO	de "traços" a 0,7
MgO	de "traços" a 1,1%;
$Na_2O + K_2O$	de "traços" a 3,2%.

Tomando os valores da Tabela 5.3 como referência, e confrontando-os com os valores da Tabela 5.1, conclui-se ser válida a inclusão das massas das Cerâmicas "A" e "B" como matérias-primas de cerâmica vermelha, pressuposto básico no encaminhamento das pesquisas realizadas ao longo desta tese. Destaquem-se, a propósito, os teores de Fe_2O_3 , de ambas as massas utilizadas, os quais se encontram próximos da média da amplitude dos valores indicados na Tabela 5.1 para o referido óxido, o que pode ser tomado como indicação básica para caracterizar as massas "A" e "B" como matéria-prima de blocos destinados à construção civil, cuja tradição no Nordeste é tê-los, efetivamente, na coloração vermelha, esta normalmente devida à presença do Fe_2O_3 .

Os teores de álcalis componentes das massas "A" e "B", apesar de bastante diferenciados quando comparados de forma relativa (o teor de álcalis na massa "A" é 11,4 vezes superior ao teor de álcalis na massa "B") não parecem ter exercido a influência diferenciada que em uma primeira análise podem sugerir, já que o valor absoluto de tais óxidos é bastante reduzido em ambas as massas (menor do que 2%).

5.1.2 Análise granulométrica por difração a “laser” das massas “A” e “B”

As Figuras 5.1 e 5.2 indicam, para as duas massas “A” e “B”, a grande predominância da soma das frações silte e argila, as quais, segundo a norma técnica NBR 7181 (1984), correspondem à faixa de “diâmetros” das suas partículas entre 0,05 e 0,005 mm para o silte, e “diâmetros” das suas partículas inferiores a 0,005 mm para a argila. Ainda a partir da análise referidas Figuras 5.1 e 5.2 e segundo o critério estabelecido pela NBR 7181 (1984), verifica-se que o teor de argila da massa “A” e o teor de argila da massa “B” são iguais a, respectivamente, 43 e 60%. Tais valores apresentam a mesma ordem de grandeza dos teores estimados para a “fração argilosa” com o emprego da “análise racional” que foram: 47,2% para massa “A”, e 66,4% para a massa “B”.

Ainda tomando os critérios da NBR7181(1984) como referência, foram verificados, para as massas “A” e “B”, os percentuais da areia e silte indicados na Tabela 4.4.

Tabela 5.4 Teores de silte e de areia das massas “A” e “B” segundo os critérios da NBR 7181 (1984)

Massa	Teor de areia	Teor de silte
“A”	3%	54%
“B”	3%	37%

:

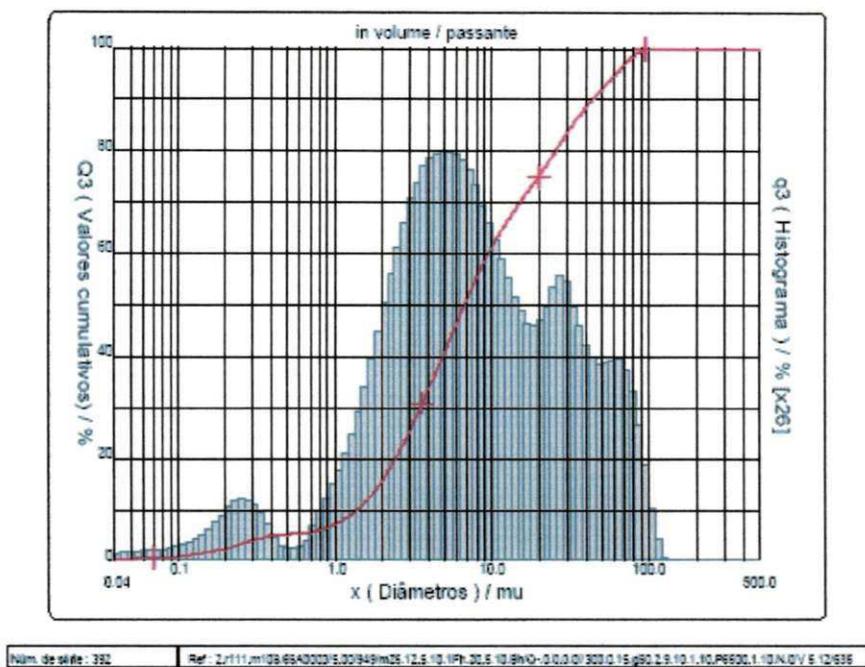


Figura 5.1- Curva granulométrica da massa da Cerâmica “A” obtida através da difração a “laser”

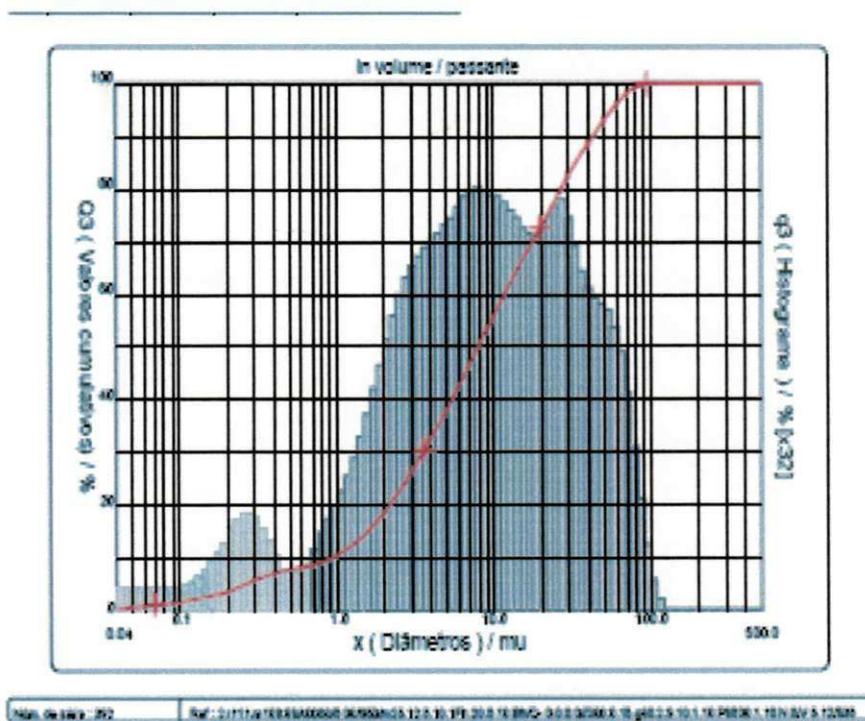


Figura 5.2 - Curva granulométrica da massa da Cerâmica “B” obtida através da difração a “laser”

5.1.3 Análise das propriedades plásticas das massas “A” e “B”

Os limites de Atterberg, cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.5, foram definidos com a fração passante na peneira ABNT nº 80, o que, apesar de não estar de conformidade rigorosa com as 6459 (1984) e 7180 (1984) da ABNT, permitiu a moldagem mais representativa dos corpos-de-prova cerâmicos destinados a esta tese.

Tabela 5.5: Características plásticas das massas utilizadas

Característica	Cerâmica “A”	Cerâmica “B”
Limite de liquidez	45,5%	41,5%
Limite de plasticidade	18,8%	21,7%
Índice de plasticidade	26,7%	19,8%

A determinação dos limites de liquidez e plasticidade é, em princípio, realizada com a fração que passa na peneira ABNT nº 40 (0,42 mm de abertura) o que, neste caso, deixa de ocorrer, conforme as considerações já constantes do item 4.1.7.

Os valores do IP confirmam que as duas massas utilizadas nesta pesquisa são trabalháveis ao longo de uma amplitude de umidades compatíveis com o tempo requerido para a extrusão, e, ao evidenciarem elevada plasticidade, mostram-se aptas à confecção de cerâmica vermelha.

Os teores de umidade para a moldagem dos corpos-de-prova cerâmicos analisados neste trabalho variam entre 23 e 27%, valores estes que corresponderam ao índice de consistência de 0,75, compatível, portanto, com o método de extrusão empregado.

5.1.4. Análise dos difratogramas das massas “A” e “B” cruas, sem adições

Os difratogramas das Figuras 5.3 e 5.4 indicam a semelhança da formação cristalina da massa “A” em relação à formação cristalina da massa “B”, pois, à exceção do óxido de ferro e magnésio $[(MgO)_{0,77} (FeO)_{0,23}]$, detectado apenas na massa “B”, a formação das massas “A” e “B” indica a presença de idênticos minerais, a saber: quartzo, caulinita, albita e sanidina.

Gomes (19880), ao lembrar que cada espécie mineral cristalina pode ser identificada pela difração da radiação X, mesmo quando faça parte de misturas com outras espécies minerais, justifica a similaridade dos difratogramas referentes às massas “A” e

“B”, apesar dos teores tão diversos de feldspatos por elas apresentados, fato já indicado na Tabela 5.2.

A propósito da diferença básica entre as massas “A” e “B”, não captada pelos difratogramas, já foi destacado que a percentagem da fração argila desta última apresenta teor significativamente superior ao da primeira, tendência que se inverte em relação ao teor de álcalis.

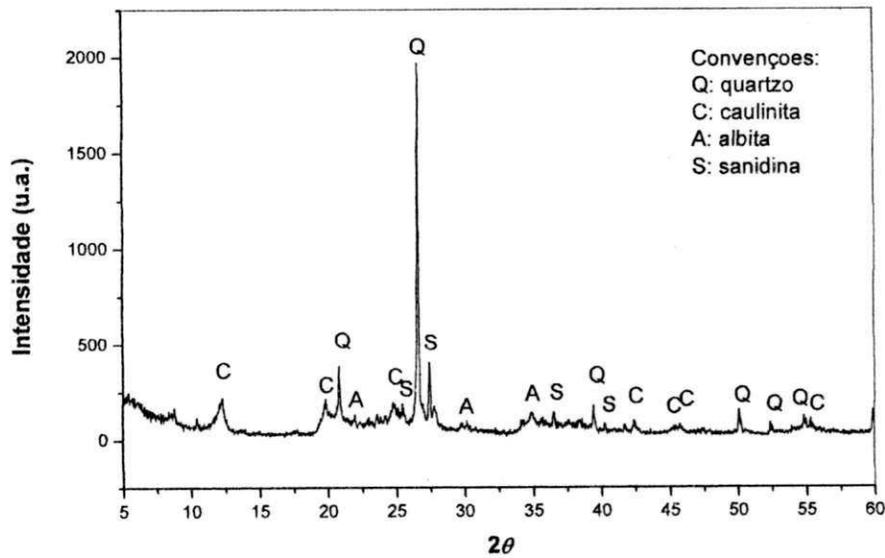


Figura 5.3 DRX da massa “A” crua e sem adições

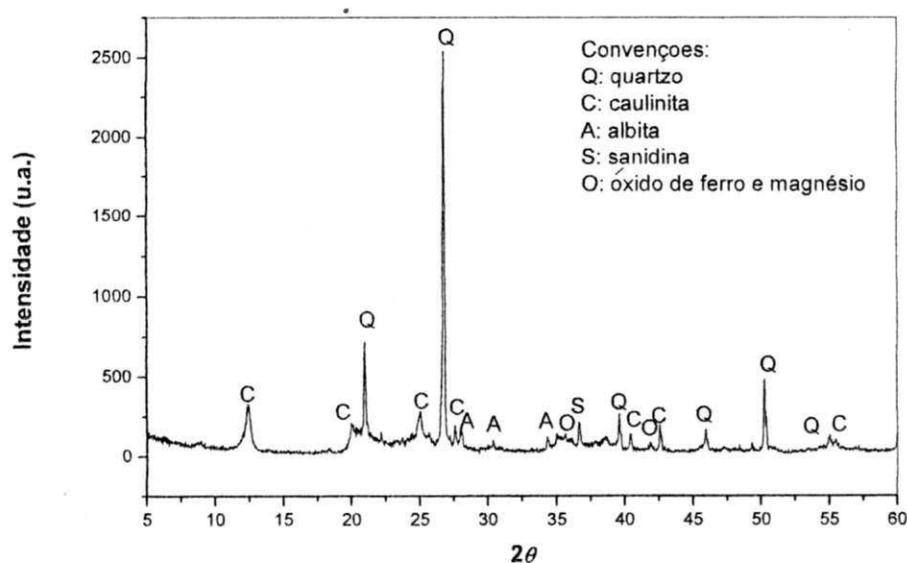


Figura 5.4 DRX da massa “B” crua e sem adições

5.1.5 Análise da DTA e da TG das massas “A” e “B” sem adições

As Figuras 5.5 e 5.6 indicam as transformações térmicas das massas “A” e “B” evidenciadas pela DTA, através da qual se destacam o pico endotérmico próximo aos 580°C, característico da perda da água decorrente da decomposição do hidróxido, e o pico exotérmico próximo aos 900°C, indicativo da nucleação da mulita. O pico endotérmico que está indicado na Figura 5.6, nas proximidades dos 300°C, é o indício da dissociação do hidróxido de alumínio constituinte da massa “B”, o qual, de fato, nesta está presente em um teor significativamente superior ao da massa “A”, conforme pode ser confirmado na Tabela 5.1.

O grande pico endotérmico próximo aos 100°C indica a perda da água livre, e não tem efetiva correlação com a configuração mineralógica dos materiais analisados.

À luz das análises termogravimétricas contidas nas Figuras 5.5 e 5.6, verifica-se que ao atingir a temperatura em volta dos 580°C, as matérias-primas argilosas “A” e “B”

apresentaram uma perda de massa da ordem de 5 a 6; entre os 200 e os 500°C, as referidas Figuras 5.5 e 5.6 apresentam uma banda discretamente exotérmica, o que também é atribuído por Campos (2002), e ratificado por Souza (2008), à combustão da matéria orgânica.

Ainda as Figuras 5.5 e 5.6, uma vez analisadas com base nas considerações de Souza Santos (1992), possibilitam se concluir que as massas das Cerâmicas “A” e “B”, além de estarem impregnadas de matéria-orgânica, se originam de argilas quaternárias recentes, em que a caulinita mal cristalizada é o argilomineral predominante.

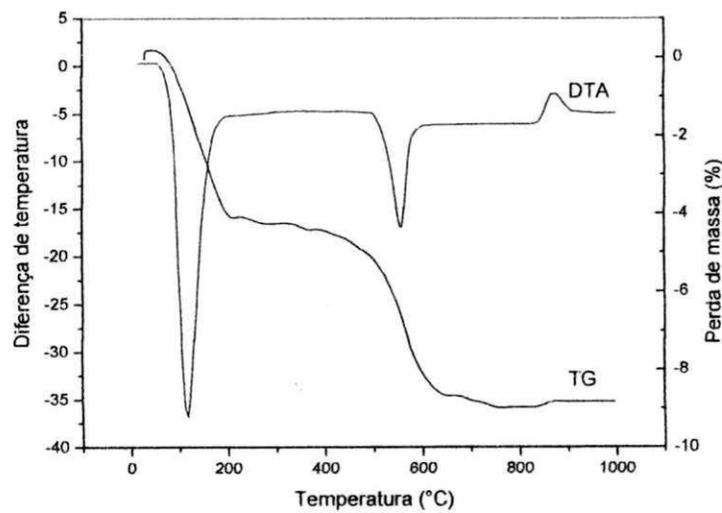


Figura 5.5 DTA e TG da massa crua da Cerâmica “A” sem adições

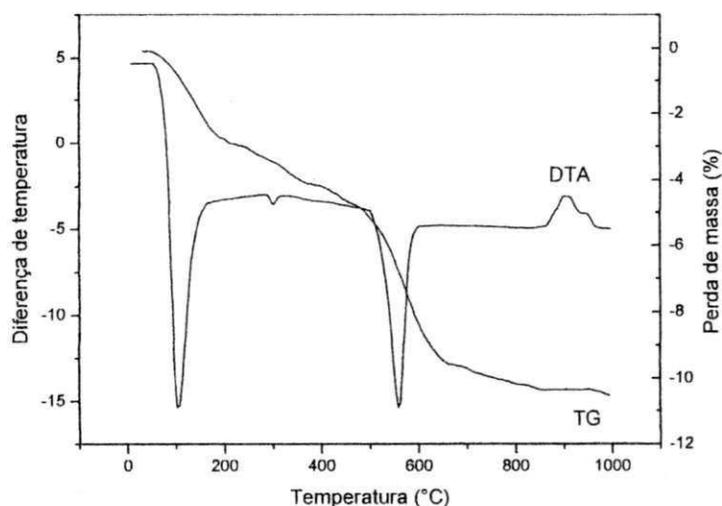


Figura 5.6 DTA e TG da massa crua da Cerâmica “B” sem adições

Conforme já foi referido no Capítulo 4, referente aos diferentes “Materiais e Métodos”, as características naturais das duas massas utilizadas nesta pesquisa foram modificadas pelo emprego do carbonato de cálcio e do hidroxicarbonato de magnésio que, adicionados em diferentes teores, geraram, sob o efeito do ciclo da queima, idênticos valores de óxidos, os quais, em última análise, se constituíram nas efetivas adições.

5.1.6 Análise dos difratogramas das adições calcária e magnésiana

As características que diferenciam a configuração cristalográfica das adições são apresentadas neste item, sem que, ainda, se discutam os aspectos benéficos ou maléficis de cada um dos dois referidos materiais impregnados às massas “A” e “B”.

O difratograma representado pela Figura 5.7 não acusa a presença de outra fase cristalina além do CaCO_3 , o que se constitui em alta probabilidade de se ter utilizado nesta pesquisa a adição calcária com reduzidíssimo grau de impureza. Este fato ratifica a expectativa gerada pela qualificação “PA” (pureza absoluta) indicada pela indústria fornecedora da referida adição.

O difratograma representado pela Figura 5.8, relativo à adição magnésiana, indica a presença do “hidroxicarbonato de magnésio hidratado” $[\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}]$, e a presença da “hidromagnesita” $[\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4]$, o que não correspondeu, de forma rigorosa, à indicação da indústria fornecedora do produto, para a qual o produto por

ela fornecido era o “hidroxicarbonato de magnésio” $[(MgCO_3)_4 + Mg(OH)_2 \cdot 5(H_2O)]$. A diferença entre a formulação indicada pelo fornecedor e aquela detectada através do difratograma, no entanto, em nada interveio no objetivo da pesquisa que era a análise do efeito das adições a partir da temperatura de queima de $850^\circ C$, ocorrência esta que gera a ação exclusiva do óxido de magnésio, seja qual for o teor de cada um dos componentes formadores do hidroxicarbonato de magnésio utilizado como adição, o que voltará a ser tratado no próximo item 5.1.7.

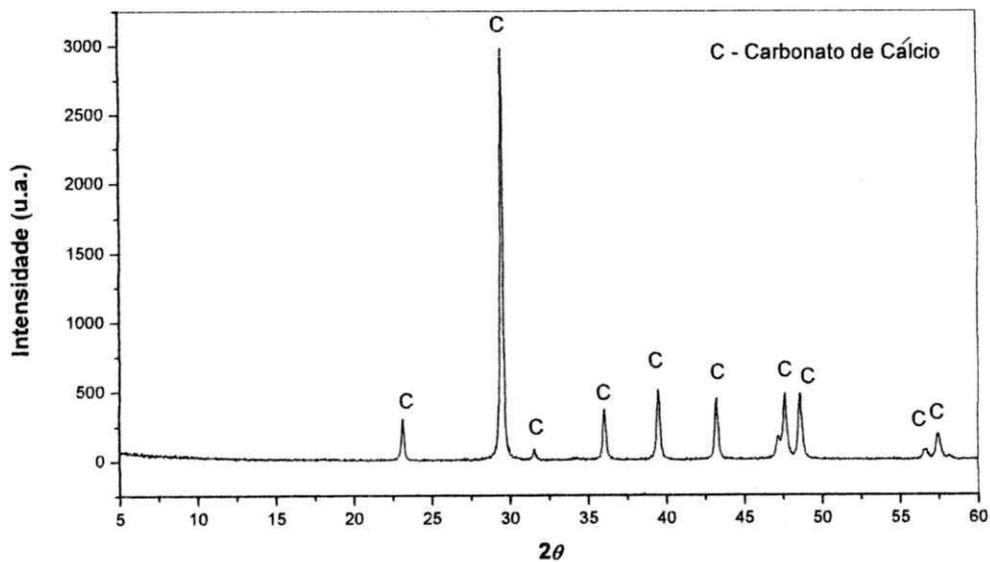


Figura 5.7 DRX da adição calcária

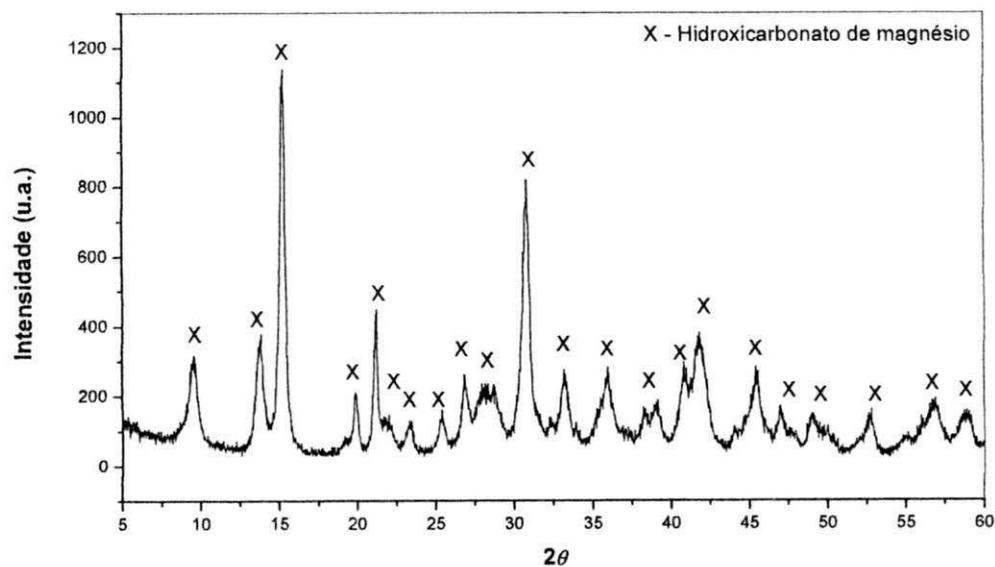


Figura 5.8 DRX da adição magnesiana

5.1.7 Análise das TGs das adições calcárias e magnesianas

A Figura 5.9, relativa à TG da adição calcária utilizada nesta pesquisa, indica a significativa perda de massa a partir dos 800°C, o que evidencia a dissociação, a tal temperatura, entre o CaO e o CO₂, este último se despreendendo em direção à atmosfera; deste fato se conclui que ao longo do ciclo da queima empregado (dos 850 aos 1000°C), a efetiva reação com a adição calcária se deu através do CaO nela remanescente, hipótese básica admitida nesta tese.

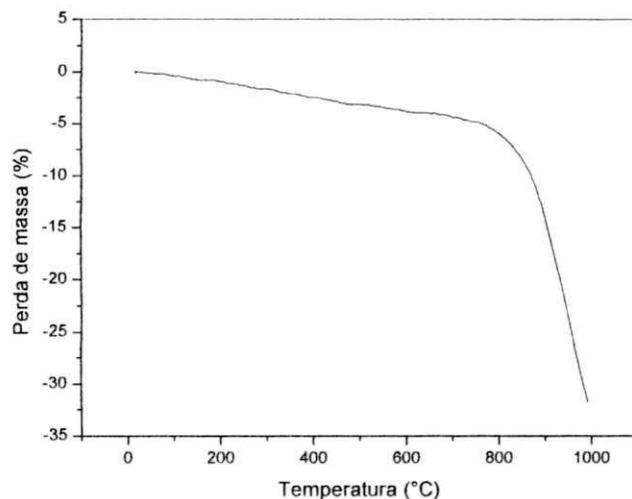


Figura 5.9 Análise térmica gravimétrica do carbonato de cálcio empregado como adição

A Figura 5.10, por sua vez, mostra a perda gradual de massa da adição magnésiana até os 600°C, a partir da qual não havia mais praticamente resíduo a se desprender, conforme se verifica através da estabilidade de massa. Todas as “impurezas” incorporadas ao MgO, portanto, se separaram de forma instantânea, aí se incluindo a elevada quantidade de água incorporada ao hidroxicarbonato utilizado. Dito de outra maneira: o fato de ter sido empregado como adição magnésiana o “hidroxicarbonato de magnésio” e/ou a “hidromagnesita” em nada alterou o fato de a efetiva adição ter sido o óxido de magnésio, pois a partir do início do ciclo da queima a perda de massa evidenciada pela Figura 5.9 coincide com a perda já indicada pelos cálculos estequiométricos ($\approx 59\%$) relativa à permanência exclusiva do MgO, fato por sinal já comentado no item anterior.

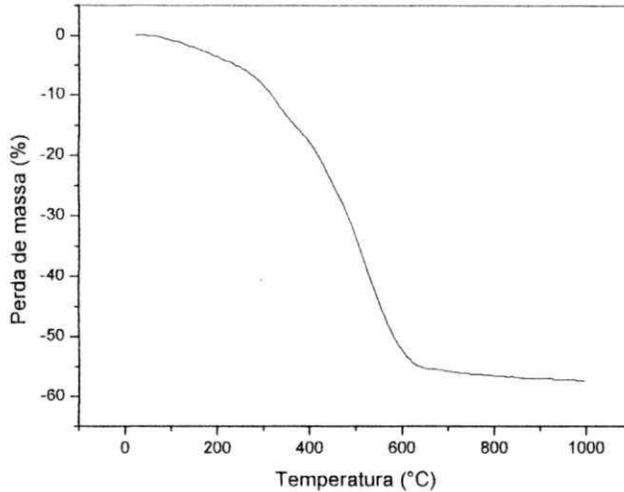


Figura 5.10 Análise térmica gravimétrica do hidroxicarbonato de magnésio empregado como adição

5.1.8 Configuração das massas “A” e “B” após a incorporação das adições calcárias e magnesianas

Conforme já foi citado no capítulo “Materiais e Métodos”, as adições foram incorporadas às massas “A” e “B” nos teores de 12,0 e 18,0% (adição calcária), e 16,3% e 24,6% (adição magnesiana); tais adições geraram idênticos teores de óxidos: 6,7 e 10,1% de CaO e de MgO.

As massas “A” e “B”, preponderantemente sílico-aluminosas, mantiveram-se como matérias-primas de cerâmica vermelha, mesmo depois de misturadas com os mais elevados teores das adições, conforme foi constatado pela estreita gama de variação da coloração dos produtos acabados (da vermelha à alaranjada), e a plasticidade de ambas, por sua vez, apesar de aumentada pelo efeito da incorporação dos carbonatos, continuou a apresentar o “índice de consistência” de 0,75 (compatível com a moldagem por extrusão) com teores de umidade muito próximos daqueles das massas isentas das referidas adições: em princípio, tais umidades seriam menores como consequência do aumento da plasticidade decorrente das adições. A manutenção da relação entre o índice de consistência e a umidade de moldagem se deveu, muito provavelmente, à elevada superfície específica das adições que, gerando grande quantidade de área a ser encoberta

pela água, acabou por compensar o aumento de plasticidade decorrente da incorporação dos dois carbonatos.

5.1.9 Análise dos difratogramas das massas “A” e “B” cruas após a incorporação das adições calcárias e magnesianas

Confirmando a expectativa, a difração de Raios X das massas cruas aditivadas, acusaram a presença dos minerais já detectados nas massas cruas no seu estado “natural” (sem as adições), e os minerais formadores das duas adições (a calcita e o hidroxicarbonato de magnésio). Registre-se, a propósito, que, pelo difratograma da mistura magnésiana, o hidroxicarbonato de magnésio foi evidenciado na forma de magnesita hidratada.

Isto posto, e dada a plena previsibilidade de resultados, tomou-se como representativa a apresentação de apenas dois difratogramas aleatoriamente escolhidos, os quais estão representados pelas Figuras 5.11 e 5.12.

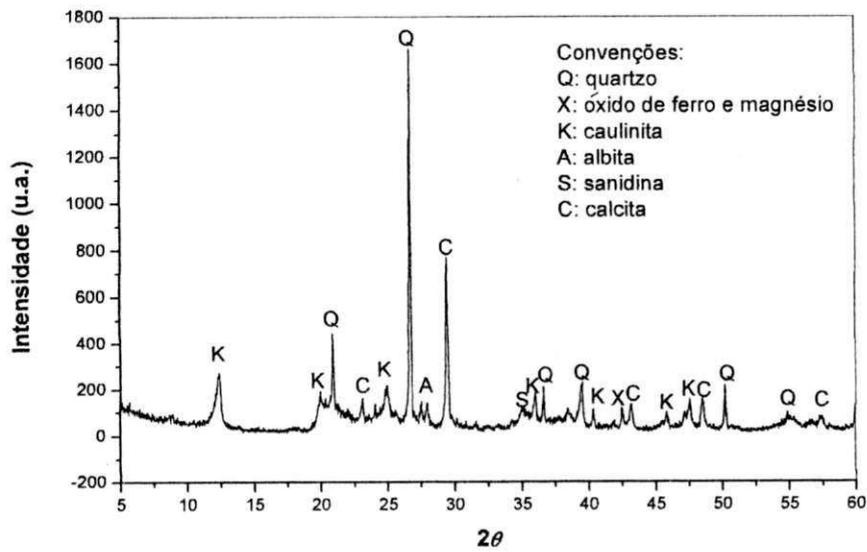
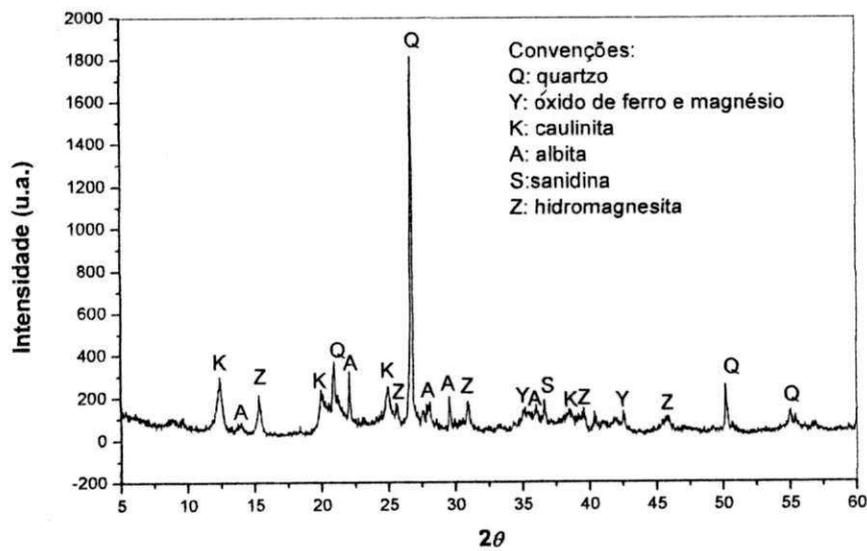


Figura 5.11 DRX da massa crua da Cerâmica "B" após a adição de 18,0% de carbonato de cálcio



5.12 DRX da massa crua da Cerâmica "B" após a adição de 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio

5.1.10 Análise das DTAs e das TGs das massas “A” e “B” após a incorporação das adições calcárias

As Figuras 5.13, 5.15, 5.17 e 5.19 destacam os picos endo e exotérmicos das massas “A” e “B” após a incorporação das adições calcárias, os quais indicam a permanência das tendências observadas nas massas “in-natura”, já que bem “preservados” estão, após a incorporação das referidas adições calcárias, o pico endotérmico próximo dos 100°C, o pico endotérmico próximo aos 580°C, e o pico exotérmico próximo aos 900°C; em relação à massa “B”, também está bastante evidente a permanência do pico exotérmico existente nas proximidades dos 300°C. A interpretação apresentada no item 5.1.1.5 relativa aos picos correspondentes aos 100, 300, 580 e 900°C das massas “A” e “B”, pode ser estendida aos picos que, citados neste item, referem-se às misturas calcárias. Assim sendo:

- o pico endotérmico nas proximidades dos 100°C caracteriza o desprendimento da água livre;

- o pico endotérmico nas proximidades dos 300°C (Figuras 5.17 e 5.19) talvez caracterize a dissociação de hidróxido de alumínio eventualmente formado a partir do Al_2O_3 da massa “B”. Tal hidróxido, cuja existência é sintomática através da interpretação da análise química, se efetivamente formado, não foi captado pela DRX.

- o pico endotérmico nas proximidades dos 580°C caracteriza a desidroxilação das argilas;

- o pico exotérmico próximo aos 900°C caracteriza a nucleação da mulita.

Nas proximidades dos 880°C, ocorre o pico “inérito” (não existente na DTA das massas “in natura”), relativo à decomposição do carbonato de cálcio, o qual, pouco perceptível nas Figuras 5.13, 5.15, e 5.17, surge de forma bem evidente na Figura 5.19.

As Figuras 5.14, 5.16, 5.18 e 5.20, relativas às análises termogravimétricas das massas “A” e “B” com adições calcárias, indicam três estágios marcantes de perda de massa, abaixo discriminados:

1º estágio: até os $\approx 200^\circ C$, indicativo da remoção da água livre;

2º estágio: dos $\approx 200^\circ C$ até os $\approx 500^\circ C$, indicativo da remoção da matéria-orgânica e, para a massa B”, também indicativo da dissociação do hidróxido de alumínio (se tal hidróxido efetivamente tiver se formado);

3º estágio: dos $\approx 500^\circ C$ até os $\approx 880^\circ C$, indicativo da dissociação do CO_2 .

Ainda com base nas referidas Figuras 5.6, 5.8, 5.10 e 5.12, verificou-se que a perda de massa correspondente a cada um dos três estágios apresentou os seguintes valores:

ao longo do 1º estágio: $\approx 4\%$ de perda de massa;

ao longo do 2º estágio: $\approx 2\%$ de perda de massa;

ao longo do 3º estágio: $\approx 7\%$ de perda de massa para 12,0% de adição cálcica, e $\approx 11\%$ de perda de massa para 18,0% de adição cálcica.

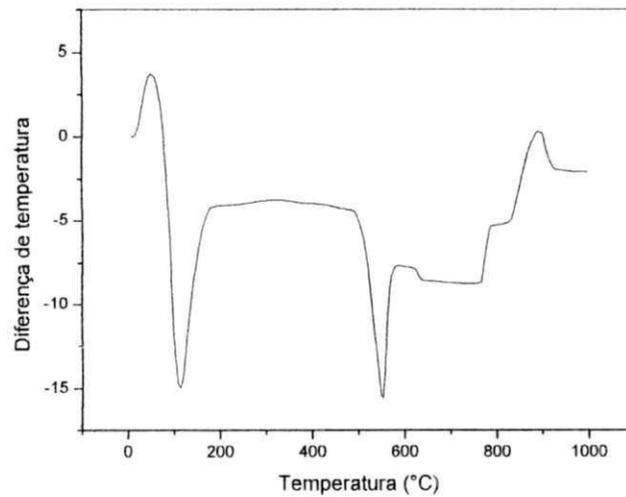


Figura 5.13 DTA da massa crua da Cerâmica "A" com 12,0% de carbonato de cálcio

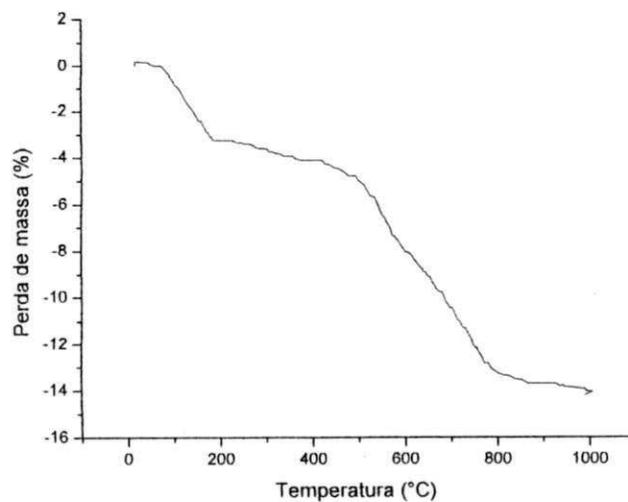


Figura 5.14 TG da massa crua da Cerâmica "A" com 12,0% de carbonato de cálcio

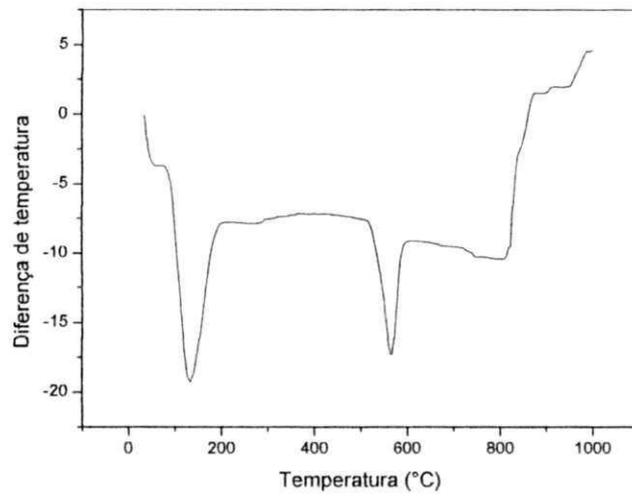


Figura 5.15 DTA da massa crua da Cerâmica "A" com 18,0% de carbonato de cálcio

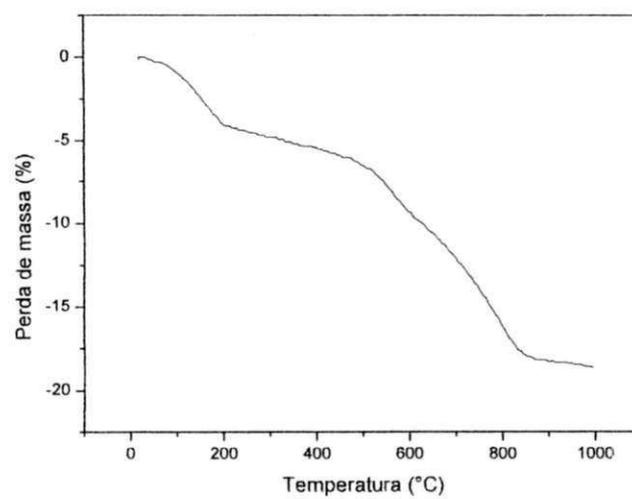


Figura 5.16 TG da massa crua da Cerâmica "A" com 18,0% de carbonato de cálcio

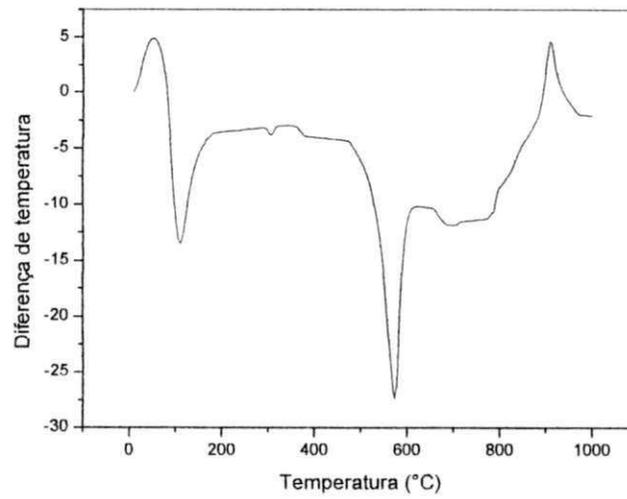


Figura 5.17 DTA da massa crua da Cerâmica "B" com 12,0% de carbonato de cálcio

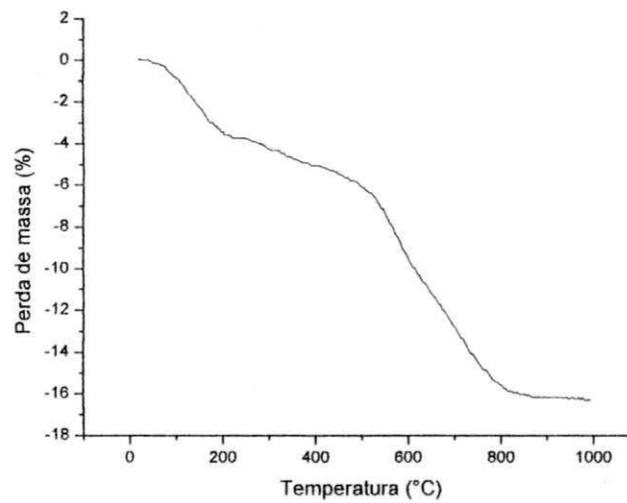


Figura 5.18 TG da massa crua da Cerâmica "B" com 12,0% de carbonato de cálcio

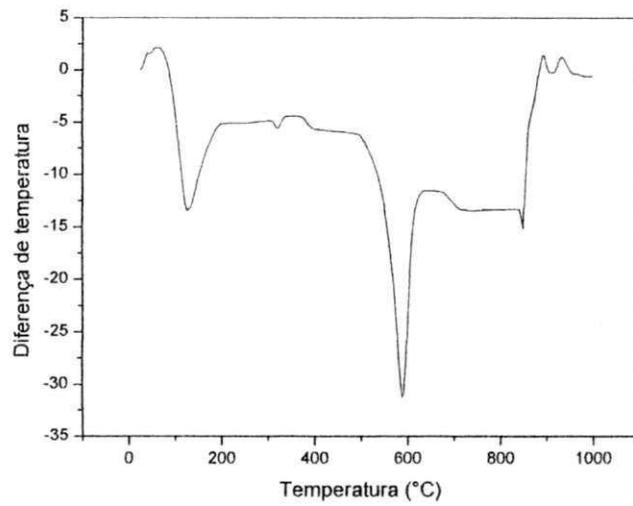


Figura 5.19 DTA da massa crua da Cerâmica "B" com 18,0% de carbonato de cálcio

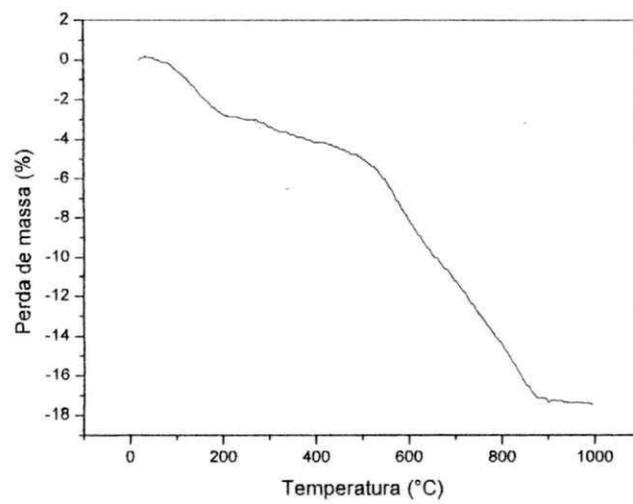


Figura 5.20 TG da massa crua da Cerâmica "B" com 18,0% de carbonato de cálcio

5.1.11 Análise das DTAs e das TGs das massas “A” e “B” cruas após a incorporação das adições magnesianas

As Figuras 5.21, 5.23 5.25 e 5.27 apresentam os picos endo e exotérmicos relativos às massas “A” e “B” modificadas pela ação do hidroxicarbonato de magnésio, ficando por elas evidente a existência de um pico endotérmico nas proximidades dos 400°C devido à perda de hidroxilas do hidróxido, e a existência de outro pico endotérmico nas proximidades dos 580°C, este devido à decomposição do carbonato. O pico exotérmico situado nas proximidades dos 900°C é a evidência da nucleação da mulita, e o pico endotérmico situado nas proximidades dos 300°C das misturas formadas com o emprego da massa “B” é o indício da dissociação do hidróxido de alumínio; a interpretação dada à existência destes dois últimos picos (900 e 300°C) em nada diferiu das referências que a eles foram feitas quando dos comentários concernentes às misturas cálcicas.

À exceção da Figura 5.23, todas as DTAs referentes às misturas magnesianas (Figuras 5.21, 5.23, 5.25 e 5.27) apresentam a banda discretamente exotérmica entre os 200 e 300°C, indicando, à semelhança do já analisado em relação às misturas cálcicas, um intervalo de temperaturas em que deve ter ocorrido a combustão de matéria-orgânica.

O grande pico endotérmico próximo aos 100°C indica a perda da água livre, e não tem efetiva relação com a configuração mineralógica dos materiais analisados.

É digno de destaque a evidência do pico endotérmico relativo à decomposição do carbonato o qual, nas misturas cálcicas, chega a ser quase imperceptível.

Tudo isto posto, os picos detectados através da análise termodiferencial das misturas magnesianas podem ser assim referidos:

- pico endotérmico nas proximidades dos 100°C relativo ao desprendimento da água livre;
- pico endotérmico nas proximidades dos 300°C relativo à dissociação do hidróxido de alumínio constituinte da massa “B”;
- pico endotérmico nas proximidades dos 400°C relativo à desidroxilação das argilas;
- pico exotérmico nas proximidades dos 580°C relativo à decomposição do carbonato de magnésio;
- pico exotérmico próximo aos 900°C relativo à nucleação da mulita.

As Figuras 5.22, 5.24, 5.26 e 5.28, relativas às análises termogravimétricas das massas “A” e “B” com adições magnesianas, indicam três estágios marcantes de perda de massa, abaixo discriminados:

1º estágio: até os $\approx 200^{\circ}\text{C}$, indicativo da remoção da água livre;

2º estágio: dos $\approx 200^{\circ}\text{C}$ até os $\approx 400^{\circ}\text{C}$, indicativo da remoção da matéria-orgânica e da desidroxilação das argilas;

3º estágio: dos $\approx 300^{\circ}\text{C}$ até os $\approx 700^{\circ}\text{C}$, indicativo da dissociação do CO_2 , da desidroxilação das argilas e da decomposição do carbonato de magnésio.

Ainda com base nas referidas Figuras 5.22, 5.24, 5.26 e 5.28, a perda de massa correspondente a cada um dos três estágios apresentou os seguintes valores:

ao longo do 1º estágio: $\approx 5\%$ de perda de massa;

ao longo do 2º estágio: $\approx 5\%$ de perda de massa;

ao longo do 3º estágio: $\approx 10\%$ de perda de massa para 16,3% de adição magnesiana, e $\approx 16\%$ de perda de massa para 24,6% de adição magnesiana.

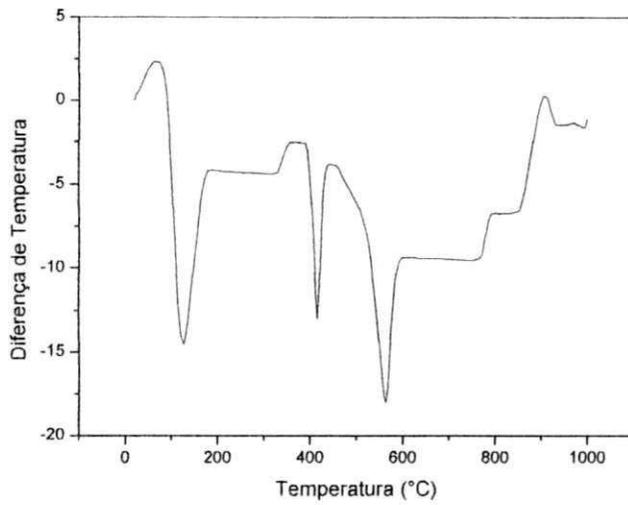


Figura 5.21 DTA da massa crua da Cerâmica "A" com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio

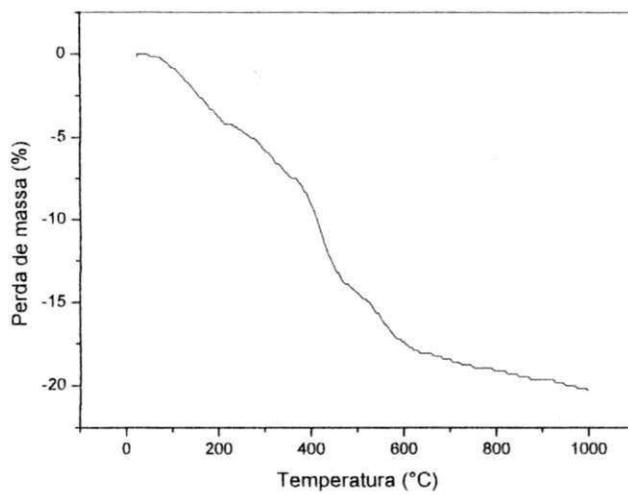


Figura 5.22 TG da massa crua da Cerâmica "A" com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio

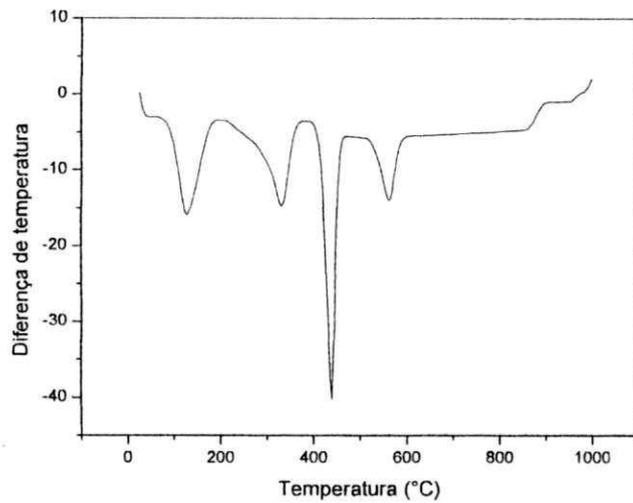


Figura 5.23 DTA da massa crua da Cerâmica “A” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio

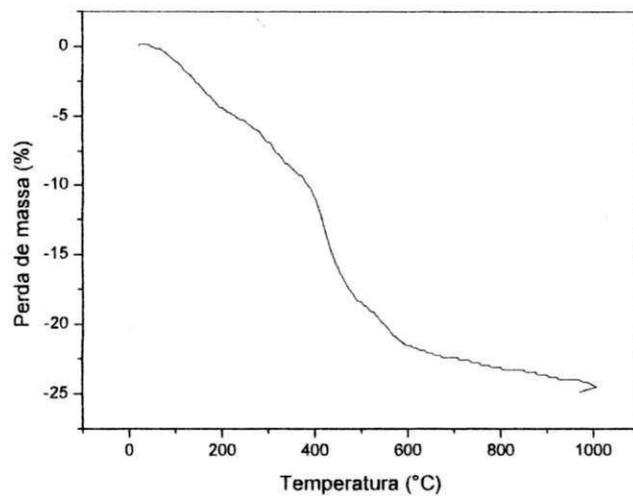


Figura 5.24 TG da massa crua da Cerâmica “A” com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio

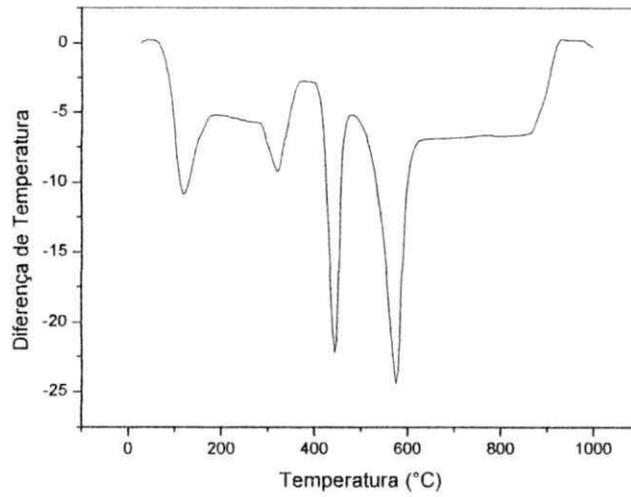


Figura 5.25 DTA da massa crua da Cerâmica "B" com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio

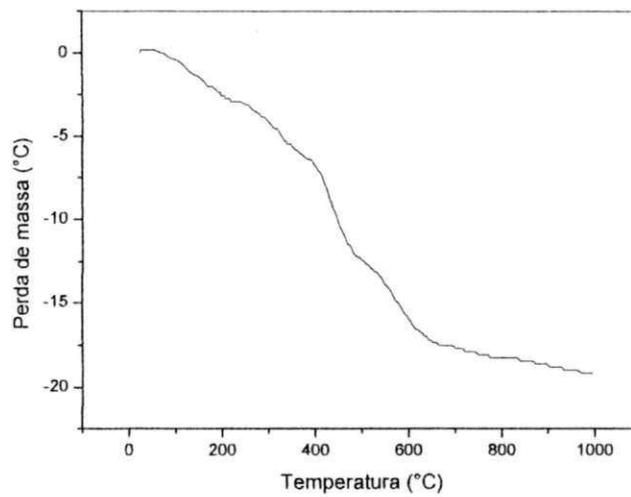


Figura 5.26 TG da massa crua da Cerâmica "B" com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio

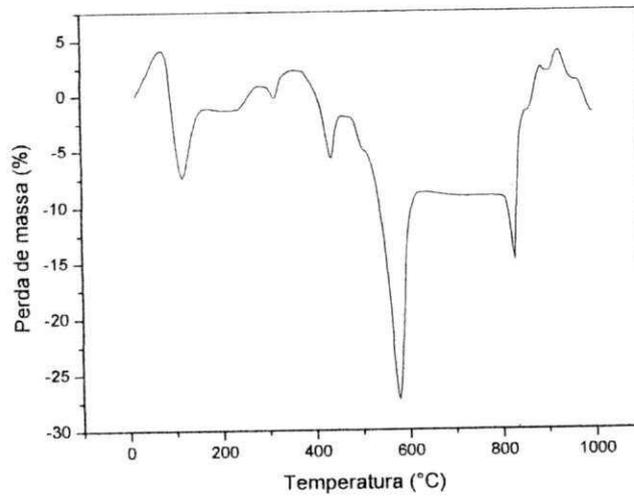


Figura 5.27 DTA da massa crua da Cerâmica "B" com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio

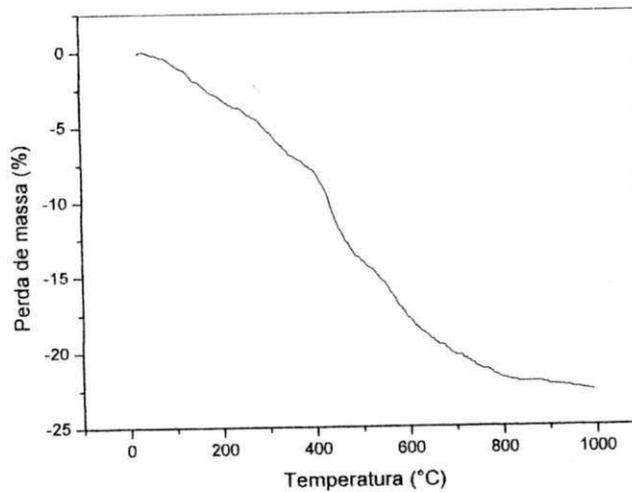


Figura 5.28 TG da massa crua da Cerâmica "B" com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio

5.2 Blocos cerâmicos: parâmetros de caracterização e considerações interpretativas

Conforme já abordado no item “Materiais e Métodos”, os corpos-de-prova crus obtidos após a extrusão das massas, estas com ou sem adições, foram queimados, saturados e submetidos aos ensaios cerâmicos e à dilatométrica; alguns deles ainda foram autoclavados antes de submetidos a tais ensaios de identificação, e, através destas citadas intervenções laboratoriais, foi possível se analisar a influência exercida pelas adições incorporadas às massas “A” e “B” sobre os parâmetros considerados neste trabalho, dentre eles destacando-se a EPU como a referência básica para as diversas hipóteses conclusivas.

5.2.1 EPU e propriedades cerâmicas dos corpos-de-prova moldados a diferentes temperaturas de queima e analisados à luz das especificações

Da Tabela 5.6 à Tabela 5.13 é apresentada uma visão ampla das propriedades fundamentais dos corpos cerâmicos empregados neste estudo.

Os resultados das características cerâmicas relativas à absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão dos corpos-de-prova moldados com as massas das Cerâmicas “A” e “B” e queimados a 850, 900, 950 e 1000°C, quando comparados com os parâmetros estabelecidos por Souza Santos (1992) relativos aos corpos-de-prova obtidos a 950°C com o emprego da matéria-prima por ele considerada como do grupo das “argilas industriais brasileiras”, indicam que todas as amostras sem adição e todas as amostras com adições calcárias se enquadraram no subgrupo da “cerâmica vermelha”, conforme os seguintes critérios indicados pelo citado pesquisador: absorção de água $\leq 25\%$, porosidade aparente $\leq 35\%$, massa específica aparente $\geq 1,70 \text{ g/cm}^3$, e tensão à ruptura à flexão $\geq 6 \text{ MPa}$. A constatação de tal enquadramento pode ser feita através da consulta às Tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9.

Recorde-se que as massas “A” e “B” já tinham sido enquadradas no grupo das matérias-primas de cerâmica vermelha quanto ao critério da análise química (item 5.1.1 – Tabela 5.3).

Mais uma vez, através das Tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, constata-se a sistemática estagnação ou redução dos valores de EPU decorrentes da ação das adições calcárias

Ainda em relação aos critérios de inclusão no subgrupo de cerâmica vermelha apresentados por Souza Santos (1992), verificou-se, através das Tabelas 5.6, 5.7,

5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13, que todos os corpos-de-prova se enquadraram no parâmetro por ele estabelecido para a resistência à flexão, a saber, 6,0 MPa; esta ocorrência pode ser creditada à baixa “relação água/massa” empregada para a moldagem dos corpos-de-prova. Tal relação correspondeu ao “índice de consistência” próximo de 0,75, o qual, conforme já referido no item 4.1.7, implicou a moldagem com a quantidade mínima da água necessária à consistência “rija”, consistência esta compatível com processo da moldagem empregada neste trabalho –extrusão–. Este raciocínio se baseia no fato de que quanto menor for o excedente da água necessária à manipulação da massa, menor será a quantidade de vazios resultante da evaporação da água excedente, o que induz à ação conjunta mais efetiva das partículas. Assim sendo, ao menor teor da água compatível com a trabalhabilidade requerida (neste caso relativa à consistência “rija”) corresponderá a mais elevada resistência mecânica compatível com as outras variáveis inerentes ao processo, tais como: secagem, queima, teor de componentes voláteis e resfriamento.

Tomando como referência a EPU, observa-se, mais uma vez através das Tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, que o aumento das adições calcárias proporcionou uma sistemática redução do referido fenômeno expansivo.

Tabela 5.6 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica "A" moldadas a diferentes teores de adições calcárias

Temperatura de Queima	Teor de CaCO ₃ →teor de CaO	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	EPU (%)	Tensão de ruptura à flexão (3 pontos) MPa
850°C	Nulo	12,72±0,74	25,10±0,65	1,98±0,07	0,013	23,99 0,82
850°C	12,0%→6,7% CaO	14,24±0,40	26,71±0,71	1,87±0,00	0,003	17,62±0,56
850°C	18,0%→10,1%CaO	15,66±0,40	29,52±0,59	1,89±0,02	0,000	17,67±0,79
900°C	Nulo	11,06±0,46	21,80±0,86	1,97±0,01	0,050	21,93±0,24
900°C	12,0%→6,7%CaO	13,55±0,36	25,50±0,62	1,88±0,01	0,000	15,81±0,45
900°C	18,0%→10,1%CaO	15,11±0,64	28,58±0,95	1,89±0,02	0,000	17,53±0,47
950°C	Nulo	7,92±0,71	16,01±0,95	2,02±0,04	0,030	26,00±0,45
950°C	12,0%→6,7%CaO	13,83±0,02	25,83±0,29	1,87±0,01	0,000	14,35±0,33
950°C	18,0%→10,1%CaO	15,44±0,39	29,23±0,52	1,89±0,01	0,000	17,35±0,53
1000°C	Nulo	6,09±1,14	12,62±2,20	2,07±0,08	0,001	21,05±1,70
1000°C	12,0%→6,7%CaO	13,86±0,16	25,73±0,33	1,87±0,04	0,000	14,00±0,43
1000°C	18,0%→10,1%CaO	16,29±0,22	30,26±0,52	1,86±0,03	0,000	15,67±0,65

Tabela 5.7 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras autoclavadas da Cerâmica "A" moldadas a diferentes teores de adições calcárias

Temperatura de Queima	Teor de CaCO ₃ →teor de CaO	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	EPU (%)	Tensão de ruptura à flexão (3 pontos) MPa
850°C	Nulo	10,94±1,18	21,48±2,10	1,97±0,02	0,114	13,67±0,72
850°C	12,0%→6,7% CaO	13,51±0,40	25,40±0,72	1,88±0,00	0,008	17,47±0,35
850°C	18,0%→10,1% CaO	15,61±0,68	29,63±0,93	1,90±0,03	0,001	18,04±0,84
900°C	Nulo	10,22±1,05	20,20±1,87	1,98±0,02	0,139	13,85±0,75
900°C	12,0%→6,7% CaO	13,48±0,25	25,40±0,39	1,88±0,01	0,005	17,04±0,39
900°C	18,0%→10,1% CaO	14,94±0,48	28,53±0,69	1,91±0,02	0,004	17,67±0,51
950°C	Nulo	7,34±0,83	15,03±1,54	2,04±0,03	0,129	14,31±1,31
950°C	12,0%→6,7% CaO	13,74±0,20	25,78±0,32	1,88±0,01	0,003	15,64±0,39
950°C	18,0%→10,1% CaO	15,92±0,31	29,94±0,44	1,88±0,01	0,003	17,65±0,39
1000°C	Nulo	5,47±0,78	11,40±1,50	2,08±0,02	0,073	14,14±0,96
1000°C	12,0%→6,7% CaO	14,33±0,37	26,69±0,68	1,86±0,01	0,008	14,59±0,28
1000°C	18,0%→10,1% CaO	16,35±0,51	30,59±0,72	1,87±0,01	0,007	16,44±0,54

Tabela 5.8 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica “B” moldadas a diferentes teores de adições calcárias

Temperatura de Queima	Teor de CaCO ₃ → teor de CaO	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	EPU (%)	Tensão de ruptura à flexão (3 pontos) MPa
850°C	Nulo	15,13±0,19	28,72±0,29	1,90±0,07	0,000	8,95 ± 0,02
850°C	12,0%→6,7% CaO	15,02±0,63	28,13±0,94	1,87±0,02	0,000	21,15±1,18
850°C	18,0%→10,1% CaO	13,73±0,21	26,18±0,28	1,91±0,01	0,000	23,57±1,14
900°C	Nulo	15,03±0,24	28,60±0,39	1,90±0,01	0,035	9,51 ± 0,18
900°C	12,0%→6,7%CaO	14,64±0,44	27,55±0,80	1,88±0,01	0,003	20,67±1,48
900°C	18,0%→10,1% CaO	13,23±0,64	25,25±1,01	1,91±0,02	0,003	22,96±1,36
950°C	Nulo	14,20±0,18	27,37±0,30	1,93±0,06	0,014	10,44±0,50
950°C	12,0%→6,7% CaO	15,00±0,50	28,25±0,84	1,88±0,01	0,005	21,13±1,74
950°C	18,0%→10,1% CaO	13,35±0,49	25,43±0,70	1,92±0,01	0,005	22,71± 0,91
1000°C	Nulo	10,98±0,56	21,94±0,97	2,00±0,02	0,025	9,76 ± 0,31
1000°C	12,0%→6,7% CaO	15,65±0,32	26,97±0,51	1,89±0,01	0,006	21,29± 0,84
1000°C	18,0%→10,1% CaO	15,98±0,56	25,13±0,91	1,89±0,01	0,006	22,23±0,67

Tabela 5.9 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras autoclavadas da Cerâmica “B” moldadas a diferentes teores de adições calcárias

Temperatura de Queima	Teor de CaCO ₃ →teor de CaO	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	EPU (%)	Tensão de ruptura à flexão (3 pontos) MPa
850°C	Nulo	15,39±0,19	29,17±0,34	1,89±0,05	0,093	8,79±0,22
850°C	12,0%→6,7% CaO	15,76±0,86	29,34±1,26	1,86±0,02	0,002	22,74±0,93
850°C	18,0%→10,1% CaO	13,63±0,97	25,87±1,62	1,90±0,02	0,007	25,54±1,22
900°C	Nulo	15,06±0,53	28,62±0,90	1,90±0,04	0,118	10,66±0,50
900°C	12,0%→6,7% CaO	15,16±0,51	28,57±0,82	1,89±0,02	0,031	23,56±0,69
900°C	18,0%→10,1% CaO	13,20±0,83	25,17±1,31	1,91±0,02	0,005	23,92±2,05
950°C	Nulo	14,21±0,31	22,28±1,33	1,99±0,01	0,150	10,91±1,99
950°C	12,0%→6,7% CaO	15,21±0,40	29,32±0,67	1,87±0,01	0,033	22,66±0,80
950°C	18,0%→10,1% CaO	12,91±0,61	30,12±1,20	1,89±0,02	0,010	24,76±1,09
1000°C	Nulo	11,21±0,75	22,28±1,33	1,99±0,01	0,179	9,77±0,55
1000°C	12,0%→6,7% CaO	15,65±0,44	29,32±0,67	1,87±0,01	0,020	20,85±0,61
1000°C	18,0%→10,1% CaO	15,98±0,80	30,12±1,20	1,89±0,02	0,009	22,47±0,87

As Tabelas 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13, por sua vez, indicam que, no que tange as adições magnesianas, as características cerâmicas dos corpos-de-prova evidenciaram a quase universal perda da identificação com a cerâmica vermelha estabelecida segundo os critérios indicados por Souza Santos (1992)

.Ainda a propósito das adições magnesianas, a análise dos resultados apresentados nas Tabelas 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 permitem se verificar que, diferentemente do que ocorreu com as adições calcárias, a adição do hidroxicarbonato de magnésio não foi a garantia da redução sistemática de EPU. Este fato insinua a influência que deve ter sido exercida pela intensidade da penetração da água sobre tal fenômeno expansivo, já que as referidas Tabelas (5.10, 5.11, 5.12 e 5.13) indicam o quanto as adições magnesianas aumentaram os valores das porosidades aparentes.

Os valores apresentados nas tabelas referidas neste item que não atenderam à especificação AS 1226.5 (1984) e/ou não se enquadraram nos parâmetros cerâmicos preconizados por Souza Santos (1992) estão destacados em coloração diferenciada.

Tabela 5.10 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica "A" moldadas a diferentes teores de adições magnesianas

Temperatura de Queima	Teor de hidroxicarbonato de magnésio → teor de MgO	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	EPU (%)	Tensão de ruptura à flexão (3pontos) MPa
850°C	Nulo	12,72±0,74	25,10±0,65	1,98±0,07	0,013	23,99±0,82
850°C	16,3%→6,7%MgO	18,77±0,35	32,10±0,56	1,71±0,01	0,016	17,22±0,56
850/C	24,6%→10,1%MgO	25,62±0,29	40,18±0,34	1,57±0,01	0,024	15,80±1,00
900°C	Nulo	11,06±0,46	21,80±0,86	1,97±0,01	0,050	21,93±0,24
900°C	16,3%→6,7%MgO	18,07±0,27	31,23±0,48	1,72±0,01	0,012	14,29±1,58
900°C	24,6%→10,1%MgO	26,12±0,30	41,05±0,38	1,57±0,01	0,026	13,17±0,67
950°C	Nulo	7,92±0,71	16,01±0,95	2,02±0,04	0,030	26,00±0,45
950°C	16,3%→6,7%MgO	15,70±0,47	27,46±0,72	1,75±0,04	0,018	16,19±1,47
950°C	24,6%→10,1%MgO	24,64±1,11	39,44±1,40	1,60±0,02	0,012	15,41±0,76
1000°C	Nulo	6,09±1,14	12,62±2,20	2,07±0,08	0,001	21,05±1,70
1000°C	16,3%→6,7%MgO	13,49±0,84	24,70±1,31	1,83±0,02	0,005	19,06±0,70
1000/C	24,6%→10,1%MgO	22,69±0,91	37,25±1,03	1,64±0,02	0,003	17,07±0,47

Tabela 5.11 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras autoclavadas da Cerâmica "A" moldadas a diferentes teores de adições magnesianas

Temperatura de Queima	Teor de hidroxicarbonato de magnésio → teor de MgO	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	EPU (%)	Tensão de ruptura à flexão (3pontos) MPa
850°C	Nulo	10,94±1,18	21,48±2,10	1,97±0,02	0,114	13,67±0,72
850°C	16,3%→6,7%MgO	21,93±0,40	36,04±0,64	1,70±0,00	0,115	13,51±2,40
850/C	24,6%→10,1%MgO	28,91±0,22	44,90±0,31	1,55±0,01	0,086	13,14±0,40
900°C	Nulo	10,22±1,05	20,20±1,87	1,98±0,02	0,139	13,85±0,75
900°C	16,3%→6,7%MgO	21,39±0,30	36,47±0,45	1,70±0,01	0,126	14,19±1,15
900°C	24,6%→10,1%MgO	27,15±0,18	43,19±0,17	1,59±0,01	0,093	13,91±1,09
950°C	Nulo	7,34±0,83	15,03±1,54	2,04±0,03	0,129	14,31±1,31
950°C	16,3%→6,7%MgO	19,37±0,45	33,73±0,73	1,74±0,01	0,135	13,71±1,69
950°C	24,6%→10,1%MgO	26,92±0,48	42,60±0,53	1,59±0,01	0,091	13,54±0,83
1000°C	Nulo	5,47±0,78	11,40±1,50	2,08±0,02	0,073	14,14±0,96
1000°C	16,3%→6,7%MgO	17,14±0,65	31,22±0,99	1,82±0,01	0,124	18,65±2,11
1000/C	24,6%→10,1%MgO	25,57±0,48	41,39±0,61	1,62±0,01	0,093	16,41±0,58

Tabela 5.12 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica “B” moldadas a diferentes teores de adições magnesianas

Temperatura de Queima	Teor de hidroxicarbonato de magnésio → teor de MgO	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	EPU (%)	Tensão de ruptura à flexão (3 pontos) MPa
850°C	Nulo	15,13±0,19	28,72±0,29	1,90±0,07	0,000	8,95±0,20
850°C	16,3%→6,7% MgO	25,36±0,78	39,69±0,61	1,55±0,01	0,039	13,62±0,97
850/C	24,6%→10,1%MgO	29,20±0,23	44,59±0,21	1,53±0,01	0,038	12,93±1,26
900°C	Nulo	15,03±0,24	28,60±0,39	1,90±0,01	0,035	9,51±0,18
900°C	16,3%→6,7%MgO	26,02±1,30	40,61±1,14	1,56±0,04	0,050	13,25±1,52
900°C	24,6%→10,1%MgO	29,26±0,44	44,96±0,33	1,53±0,01	0,033	10,10±0,80
950°C	Nulo	14,20±0,18	27,37±0,30	1,93±0,06	0,014	10,44±0,50
950°C	16,3%→6,7%MgO	24,14±0,25	39,34±0,28	1,63±0,01	0,042	14,26±1,47
950°C	24,6%→10,1%MgO	27,87±0,21	43,80±0,23	1,57±0,01	0,055	10,44±0,40
1000°C	Nulo	10,98±0,56	21,90±0,97	2,00±0,02	0,025	9,76±0,31
1000°C	16,3%→6,7%MgO	19,14±0,67	33,91±0,84	1,77±0,02	0,028	17,71±0,97
1000/C	24,6%→10,1%MgO	23,68±0,71	39,51±0,81	1,67±0,02	0,026	14,39±1,31

Tabela 5.13 Resultados dos ensaios cerâmicos e EPU das amostras autoclavadas da Cerâmica “B” moldadas a diferentes teores de adições magnesianas

Temperatura de Queima	Teor de hidroxicarbonato de magnésio → teor de MgO	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	EPU (%)	Tensão de ruptura à flexão (3 pontos) MPa
850°C	Nulo	15,39±0,19	29,10±0,34	1,89±0,05	0,093	8,79±0,22
850°C	16,3%→6,7% MgO	28,44±0,35	43,91±0,50	1,54±0,00	0,153	12,35±1,80
850/C	24,6%→10,1%MgO	30,35±0,29	46,28±0,22	1,52±0,01	0,138	9,27±0,89
900°C	Nulo	15,06±0,53	28,62±0,99	1,90±0,04	0,118	10,66±0,50
900°C	16,3%→6,7%MgO	27,43±0,40	43,27±0,37	1,58±0,01	0,127	10,78±0,79
900°C	24,6%→10,1%MgO	28,98±0,43	45,02±0,40	1,55±0,01	0,116	10,01±0,85
950°C	Nulo	14,21±0,31	27,32±0,54	1,92±0,06	0,150	10,91±0,35
950°C	16,3%→6,7%MgO	25,78±0,46	41,72±0,44	1,62±0,01	0,140	12,14±1,07
950°C	24,6%→10,1%MgO	28,12±0,27	44,27±0,29	1,57±0,01	0,106	10,91±0,49
1000°C	Nulo	11,21±0,75	22,28±1,33	1,99±0,01	0,179	9,77±0,55
1000°C	16,3%→6,7%MgO	20,68±1,14	36,40±1,35	1,76±0,03	0,150	17,47±1,55
1000/C	24,6%→10,1%MgO	24,84±0,73	41,06±0,02	1,65±0,02	0,122	14,93±0,71

5.2.2 Influência recíproca entre a EPU e os demais parâmetros pesquisados

A partir das análises mineralógica, difratométrica e térmica das massas “A” e “B”, bem como das características cerâmicas dos blocos moldados com o emprego de tais matérias-primas argilosas, procura-se, neste item, inferir um horizonte probabilístico para valores de EPU a prazos compatíveis com o tempo normalmente vislumbrado para a vida útil das edificações concebidas na Engenharia Civil.

5.2.2.1 Correlação entre a EPU e as características mineralógicas das massas “A” e “B” associadas às temperaturas de queima

A Figura 5.29 apresenta a variação de valores das EPUs das massas “A” e “B” resultante da ação exercida pelas temperaturas da queima, e, através da análise calcada em tal figura, são confirmadas, para as amostras autoclavadas e obtidas às temperaturas de queima até os 925°C, as indicações da literatura, a qual admite menores valores de EPU para massa com menores teores de álcalis. Até este limite de queima (925°C), os valores da EPU das amostras da Cerâmica “B” se mostraram efetivamente inferiores aos valores da EPU da Cerâmica “A”, embora com tendência sistematicamente ascendente. Para as temperaturas acima dos 925°C, no entanto, deixa de ser atendida a expectativa de maiores valores de EPU da Cerâmica “A”, e, a propósito, consulte-se a Tabela 5.14, em que a relação A/S da Cerâmica “A” é inferior à relação A/S da Cerâmica “B”, tendência que se altera quanto às relações (N+K)/A e (N+K)/S.

Tabela 5.14 Correlações alumina/silica (A/S), {(óxido de sódio + óxido de potássio) / (alumina) [(N+K)/A]} e {(óxido de sódio + óxido de potássio) / (dióxido de silício) [(N+K)/S]} das massas utilizadas

Correlação	Cerâmica “A”	Cerâmica “B”
A/S	0,28	0,42
(N+K)/A	0,09	0,006
(N+K)/S	0,02	0,002

Dessa forma, deixa de ser atendida a expectativa gerada pela literatura, segundo a qual, em função destas três últimas relações (indicativas de mais elevados teores de álcalis da massa “A”), deveriam as EPUs da Cerâmica “A” sempre apresentar valores superiores aos das EPUs da Cerâmica “B”, o que não se observa para as amostras autoclavadas a

partir de temperaturas de queima próximas aos 925°, e para as amostras não autoclavadas a partir da temperatura de 972°C.

Pode-se explicar esta aparente contradição (valores de EPU da massa “B” maiores a partir dos 925°C) com o emprego da relação estabelecida por COLE e BANKS (1991) [%Quartzo livre = %SiO₂ - 1,24%Al₂O₃], através da qual se estimaram em 44,9% e 31,4% os teores de quartzo livre para as Cerâmicas “A” e “B”, respectivamente. A partir dos valores estimados para a percentagem de quartzo livre, tornou-se possível também se estimar a ordem de grandeza do teor de argila de cada uma das duas massas analisadas, o que, aliás, já foi indicado nesta tese através da aplicação da análise racional estabelecida por Ries (1928) e ratificada por SOUZA SANTOS (2002). Os teores de substância argilosa estimados através da análise racional, apresentados na Tabela 5.2, foram 47,2% para a massa “A”, e 66,4%, para a massa “B”.

A propósito da correlação entre o percentual de quartzo livre e EPU, Menezes (2001), ao analisar as características dos produtos para revestimento de vinte e três Cerâmicas do estado da Paraíba, obteve resultados que confirmaram uma evidente tendência para que a baixos teores de EPU correspondam elevados percentuais de quartzo livre, ou, raciocinando-se em sentido inverso, a tendência a elevados valores de EPU para elevados percentuais de substância argilosa, já que a substância argilosa formará mais fase líquida e/ou amorfa.

Considerando, conforme já foi indicado, que o teor de substância argilosa da massa da Cerâmica “A” é significativamente inferior ao teor de substância argilosa da massa da Cerâmica “B” (o que é ratificado pelo menor teor de quartzo livre desta última), passa a ser justificada a tendência de aumento das EPU relativos à Cerâmica “B”, quando se sabe que como consequência do seu maior teor de substância argilosa dá-se a tendência à maior profusão das fases líquida e/ou amorfa, o que acabaria por justificar a tendência à maior EPU da massa da Cerâmica “B” após os 925° (ou 972°C para as amostras não autoclavadas), temperaturas compatíveis com a formação das referidas fases não cristalinas: líquida e/ou amorfa, portanto.

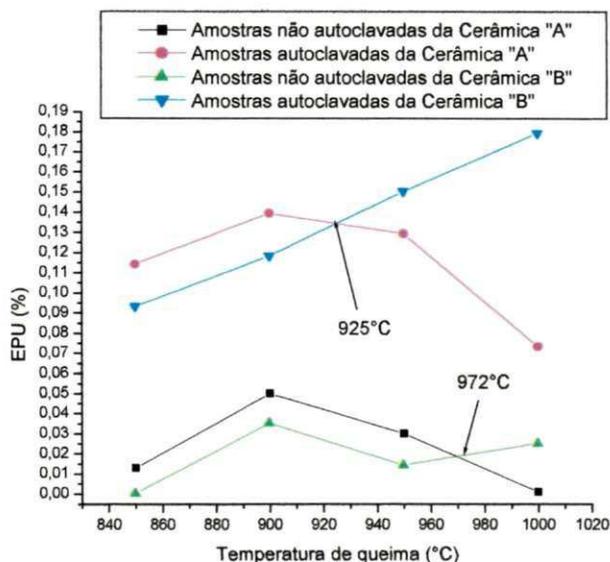


Figura 5. 29 Temperatura de queima versus EPU dos blocos das Cerâmicas “A” e “B” moldados sem adições

Na Figura 5.29 também está indicada a tendência de inversão dos valores crescentes das EPU das amostras não autoclavadas da Cerâmica “A”, o que, ocorrendo à temperatura acima dos 925°C, insinua o efeito acelerador da autoclavagem sobre as reações químicas.

5.2.2.2 Correlação entre a EPU dos blocos autoclavados obtidos a diferentes temperaturas, e os tipos das adições utilizadas

As Figuras 5.30 e 5.31 destacam a influência que, ao longo do ciclo de queima, é exercida pelas duas adições sobre a EPU, sendo notável, conforme os dados depreendidos, a redução de tal fenômeno expansivo resultante da ação do carbonato de cálcio, tanto na Cerâmica “A”, quanto na Cerâmica “B”. As referidas figuras também indicam que as adições feitas de hidoxicarbonato de magnésio às massas das Cerâmicas “A” e “B”, apenas discretamente delas reduzem a EPU, quando para o seu acréscimo não contribuem.

Recorrendo-se, mais uma vez, às Figuras 5.30 e 5.31, constata-se a discretíssima e às vezes inexistente redução das EPU resultantes das incorporações magnesianas, fato ressaltado pela forma marcante como se dá o contrário em relação às incorporações calcárias.

A interferência marcadamente diferenciada das adições empregadas deve-se, sobretudo, a fenômenos já catalogados pela literatura relativos às diferenças inerentes à formação e evolução de fases cristalinas, à intensidade de caminhos de acesso da água, e à perda de massa do pó resultante da fragmentação dos blocos queimados e autoclavados

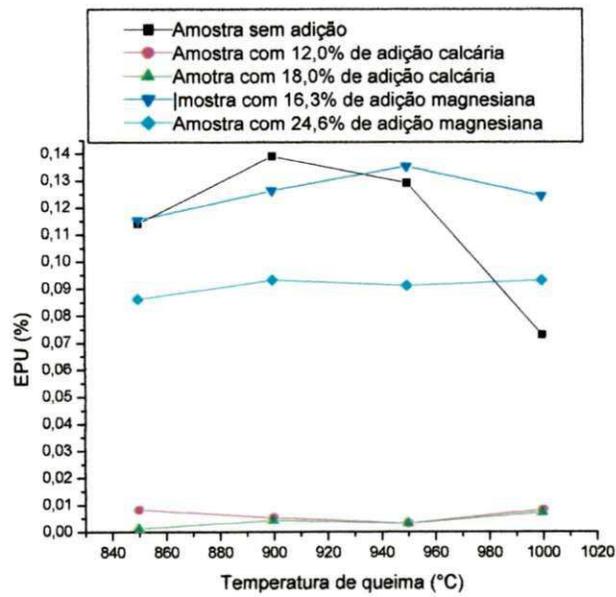


Figura 5.30 EPU versus temperatura de queima das amostras autoclavadas da Cerâmica "A"

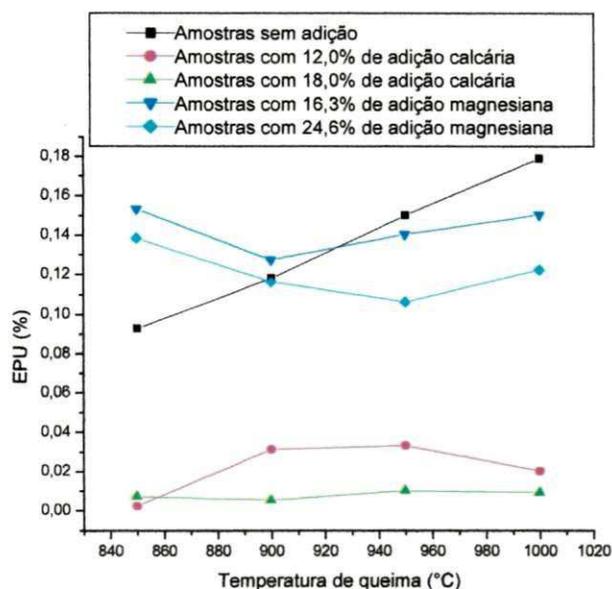


Figura 5.31 EPU versus temperatura de queima das amostras autoclavadas da Cerâmica “B”

5.2.2.3 Correlação entre a EPU e os resultados difratométricos dos blocos autoclavados obtidos a 1000°C

As Figuras 5.32 e 5.33, quando comparadas com as Figuras 5.3 e 5.4, deixam evidente as modificações profundas da constituição mineralógica das massas cruas “A” e “B” após submetida à autoclavagem e à temperatura e queima de 1000°C, a ponto de, à exceção do quartzo, não ter sido preservado nenhum vestígio efetivo de identificação das referidas massas no seu estado “natural”. Neste contexto, é de se supor que a decomposição da fase caulinita tenha facilitado a formação das fases cristalinas posteriormente detectadas sob o efeito das adições.

As Figuras 5.34, 5.35, 5.38 e 5.39 indicam que as adições calcárias incorporadas às massas “A” e “B” precipitam a formação, em ambas, da augita, e as Figuras 5.36, 5.37, 5.40 e 5.41, por sua vez, indicam que a incorporação das adições magnesianas precipitam, também nas massas “A” e “B”, a formação da brucita e enstatita, além da ringwoodita, esta última apenas na massa “B”. Tal constatação se reveste de suma importância, pois comprova a formação de novas fases cristalinas decorrentes de reações entre diferentes minerais, a temperaturas da ordem dos 1000°C (ou mesmo abaixo desta), o

que pode se tornar em referência fundamental no controle da EPU dos blocos cerâmicos, os quais são obtidos a temperaturas de queima relativamente baixas.

Lira (1997), Rodrigues (2002) e Pereira (2002), através dos seus estudos, ratificaram o que já se constitui em consenso entre os estudiosos: a formação cristalina, por diminuir o teor de fases vítreas, vai ao encontro das conceituações teóricas relativas à EPU, e promovem a sua redução; tudo isto posto, pode-se ainda inferir que além da comprovada fase cristalina que se formou como consequência das adições calcárias (augita), também parece ser válida a afirmação de Besoain (1985) para quem a sílica da caulinita se cristaliza como quartzo abaixo dos 870°C, e como tridimita a partir dos 870°C. Assim sendo, pode-se admitir que a permanência da configuração silicosa das massa modificadas pelas adições calcárias, confirmada pelas DTAs indicadas nas Figuras 5.13, 5.15, 5.17 e 5.19, também contribuíram para a redução da EPU devida às adições calcárias

A propósito das fases cristalinas decorrentes das adições feitas às massas estudadas, o “match result” assim as apresenta:

Augita: silicato de cálcio, ferro e magnésio: [Ca (Mg, Fe) Si₂O₆]

Enstatita; silicato de magnésio: [MgSiO₃]

Ringwoodita: silicato de ferro e magnésio: [(Mg,Fe)₂ SiO₄]

Óxido de ferro e magnésio: [(MgO)_{0,77} (Fe)_{0,23}]

Silicato de alumínio e magnésio: [Mg₂Al₄Si₅O₁₈]

Brucita: hidróxido de magnésio: [Mg(OH)₂]

Pode-se ainda inferir que além das comprovadas fases cristalinas que se formaram como consequência da presença das duas adições, também parece ser válida a afirmação de Besoain (1985) para quem a sílica da caulinita se cristaliza como quartzo abaixo dos 870°C, e como tridimita a partir dos 870°C. Assim sendo, pode-se admitir que os elevados teores de minerais silicosos presentes nas frações caulínicas das massas “A” e “B” tenham contribuído para a redução da EPU.

Apesar de os difratômetros relativos às misturas com a adição de carbonato de cálcio não terem evidenciado o CaO ou o Ca(OH)₂, possivelmente pela “consumo” pleno destes na formação de fases cristalinas, eles evidenciaram, no entanto, para as misturas com a adição do hidroxicarbonato de magnésio, a presença do Mg(OH)₂ (brucita)

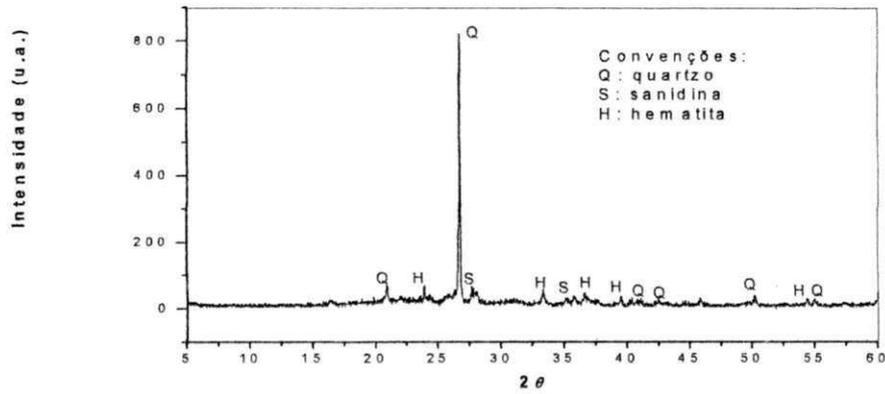


Figura 5.32 DRX de blocos da Cerâmica “A” moldados sem adição, autoclavados e queimados a 1000°C

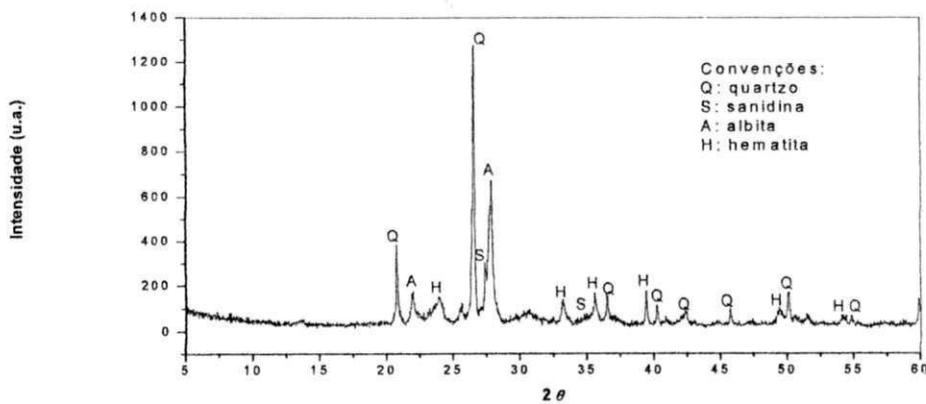


Figura 5.33 DRX de blocos da Cerâmica “B” moldados sem adição, autoclavados e queimados a 1000°C

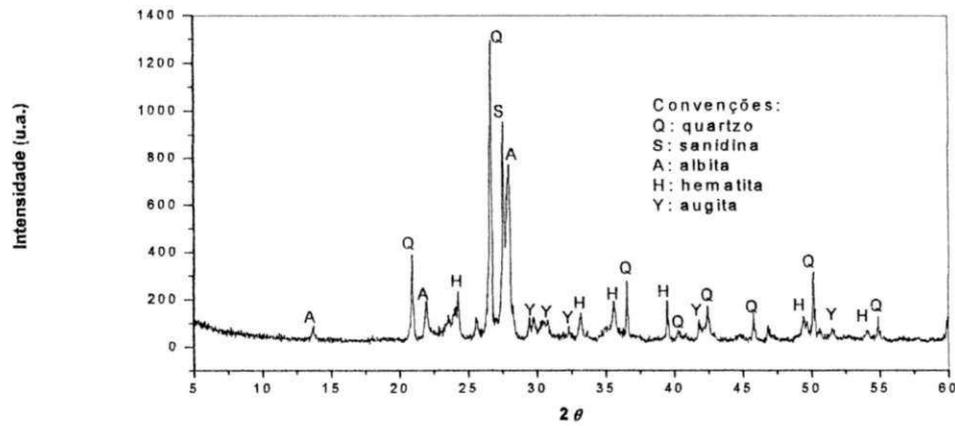


Figura 5.34 DRX de blocos da Cerâmica "A" com 12,0% de carbonato de cálcio, autoclavados e queimados a 1000°C

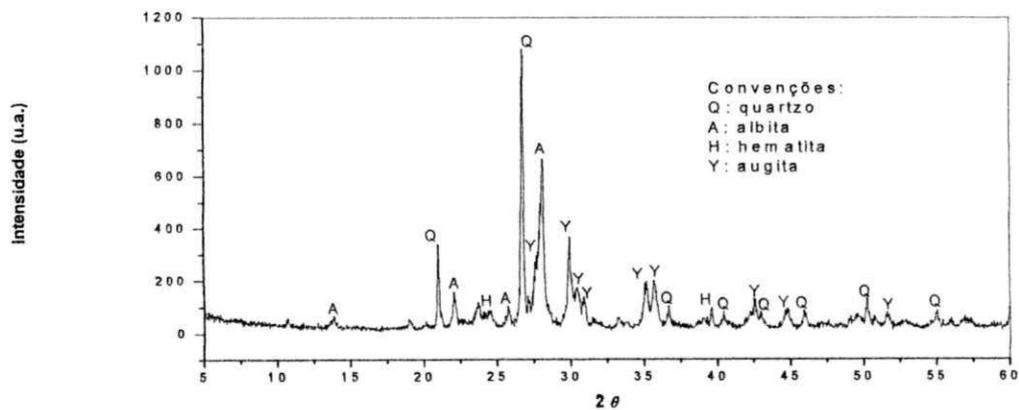


Figura 5.35 DRX de blocos da cerâmica "A" com 18,0% de carbonato de cálcio, autoclavados e queimados a 1000°C

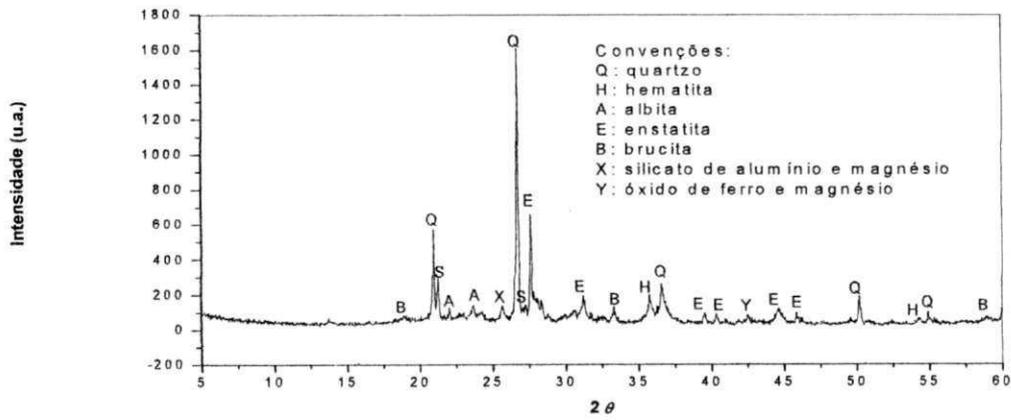


Figura 5.36 DRX de blocos da Cerâmica "A" com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio, autoavados e queimados a 1000°C

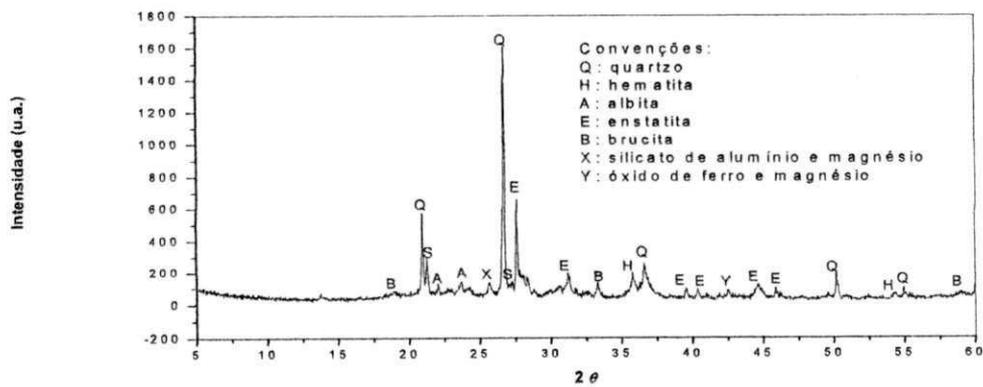


Figura 5.37 DRX de blocos da Cerâmica "A" com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavados e queimados a 1000°C

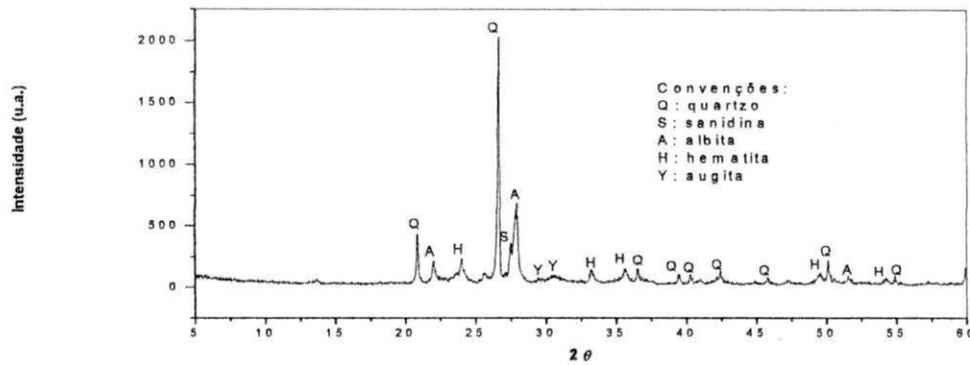


Figura 5.38 DRX de blocos da Cerâmica "B" com 12,0% de carbonato de cálcio, autoclavados e queimados a 1000°C

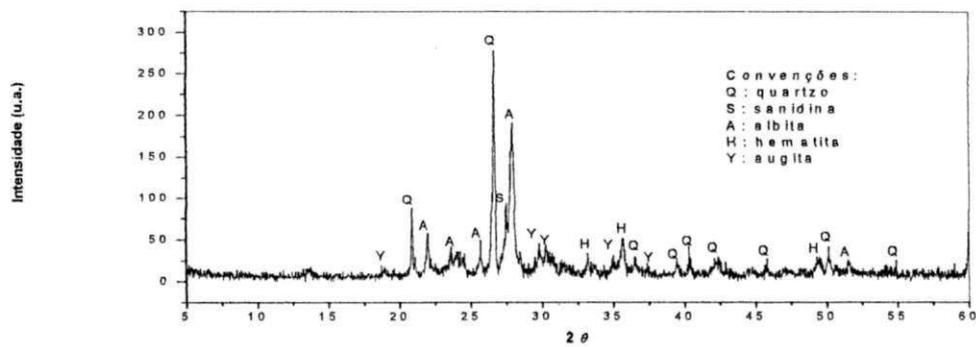


Figura 5.39 DRX de blocos da Cerâmica "B" com 18,0% de carbonato de cálcio, autoclavados e queimados a 1000°C

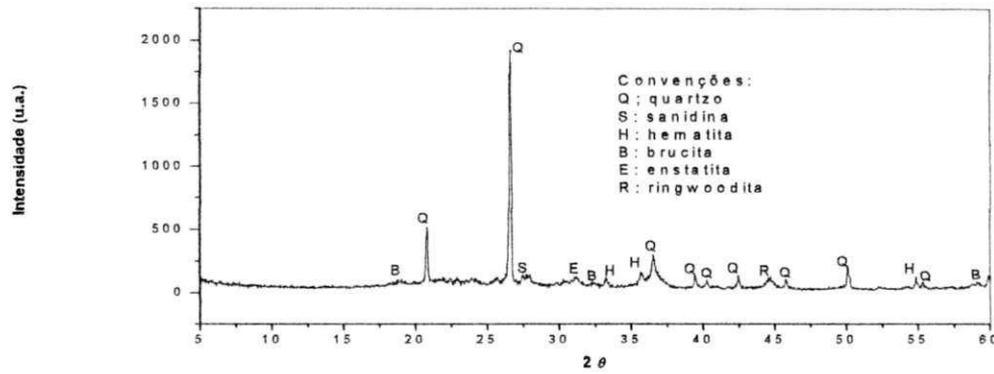


Figura 5.40 DRX de blocos da Cerâmica "B" com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavados e queimados a 1000°C

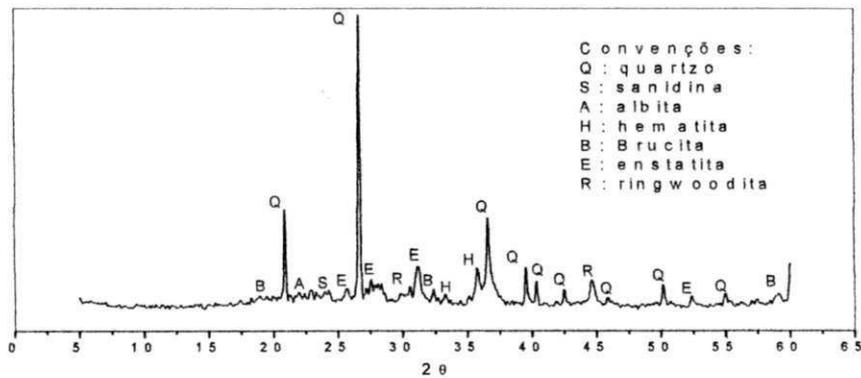


Figura 5.41 DRX de blocos da Cerâmica "B" com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavados e queimados a 1000°C

5.2.2.4 Correlação entre a EPU e as TGs dos blocos autoclavados obtidos a 1000°C

As Figuras 5.42 e 5.43 indicam que a perda de massa entre os 100 e 1000°C da matéria-prima argilosa da Cerâmica “A” foi de 3,0%, e da matéria-prima argilosa da Cerâmica “B” foi de 2,0%, percentagens essas que passaram para 2,0% e 3,1% após, respectivamente, o emprego das adições calcárias e magnesianas, conforme está indicado nas Figuras 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 e 5.48.

A perda de massa das misturas magnesianas 55% superior à perda de massa das misturas calcárias (ambas queimadas a 1000°C e autoclavadas) se constitui em forte indício para que ocorram valores de EPU da primeira superiores aos desta última, o que, de fato, foi constatado nesta pesquisa; deve-se ainda acrescentar que as referidas perdas de massa foram avaliadas a partir da temperatura dos 100°C, o que implicou em não se incluírem as perdas de massa devidas à eliminação da água absorvida.

Menezes (2006), ao ratificar conclusões de pesquisadores que o precederem, observou que, de fato, a maior perda de massa tende a gerar maiores valores de EPU, já que a perda de massa está probabilisticamente relacionada com o aumento da absorção de água e, daí, o aumento da acessibilidade de água adsorvida às fases amorfas e/ou vítreas. É justamente a maior acessibilidade de água decorrente da maior perda de massa que gera a tendência a maiores valores de EPU.

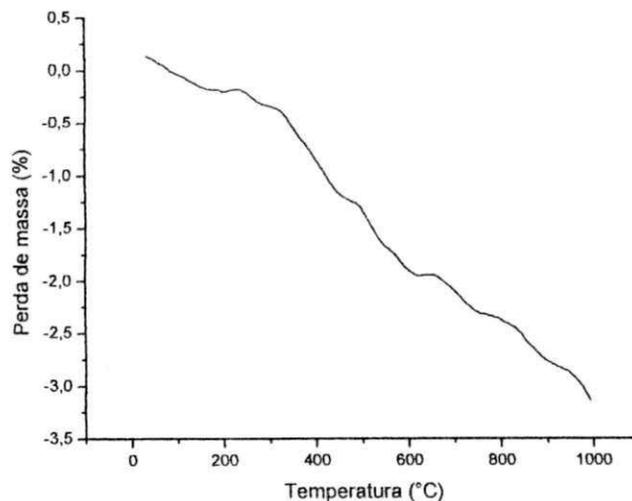


Figura 5.42 TG da massa da Cerâmica “A” sem adições, autoclavada e queimada a 1000°C

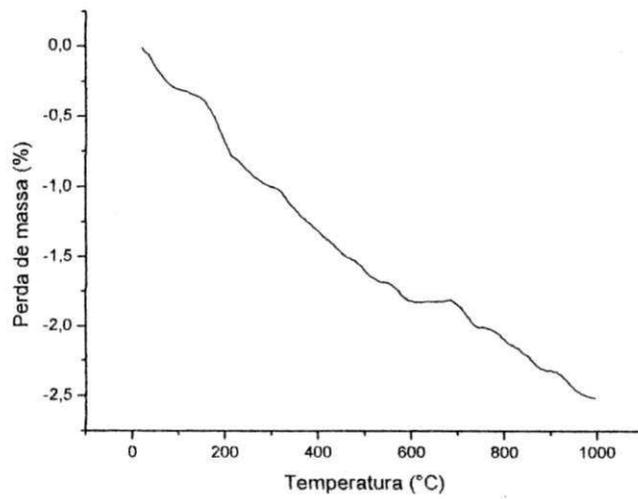


Figura 5.43 TG da massa da Cerâmica "B" sem adições, autoclavada e queimada a 1000°C

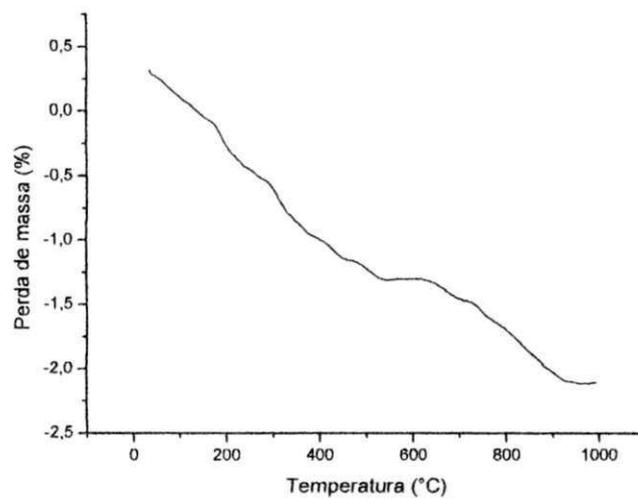


Figura 5.44 TG da massa da Cerâmica "A" com 12,0% de carbonato de cálcio, autoclavada e queimada a 1000°C

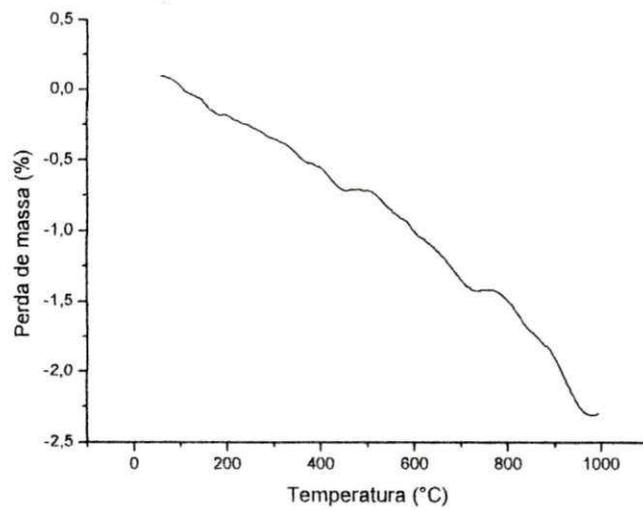


Figura 5.45 TG da massa da Cerâmica "B" com 12,0% de carbonato de cálcio, autoclavada e queimada a 1000°C

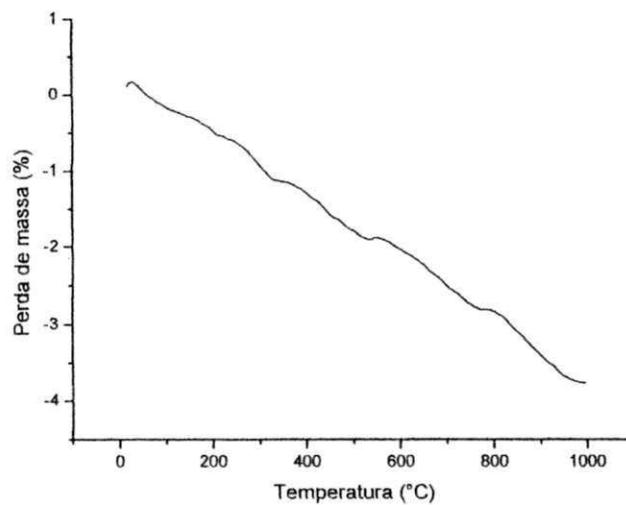


Figura 5.46 TG da massa da Cerâmica "A" com 24,6% de hidróxycarbonato de magnésio, autoclavada e queimada a 1000°C

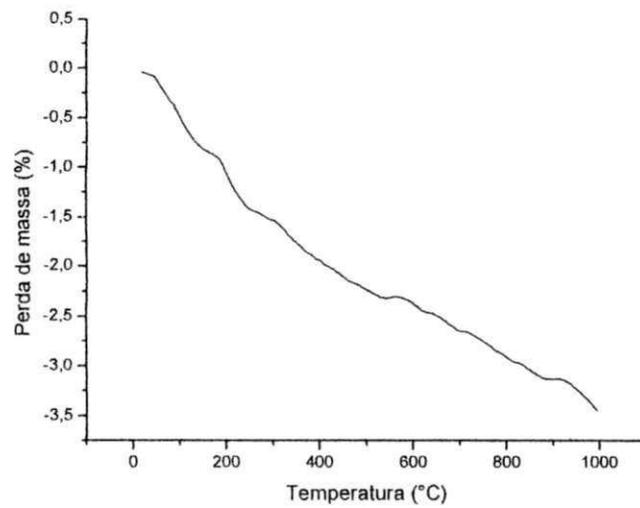


Figura 5.47 TG da massa da Cerâmica "B" com 16,3% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavada e queimada a 1000°C

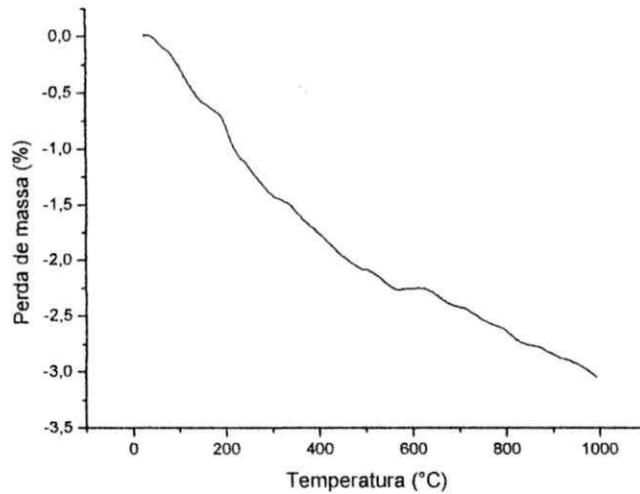


Figura 5.48 TG da massa da Cerâmica "B" com 24,6% de hidroxicarbonato de magnésio, autoclavada e queimada a 1000°C

5.2.2.5 Correlação entre a EPU e a absorção de água dos blocos autoclavados (com ênfase à variação das temperaturas de queima)

Neste item, é detalhada a associação entre os fenômenos EPU e AA (absorção de água) considerando-se como parâmetros geradores de tal interação as temperaturas de queima e o tipo e teor de adição.

Constata-se, através das Figuras 5.49 e 5.50, que as amostras sem adições tendem, sistematicamente, à redução da AA à medida que aumentam as temperaturas de queima, sem que a tal redução de AA correspondam baixos valores de EPU (quando estes são comparados com os valores das EPU das amostras aditivadas). Infere-se, portanto, das citadas constatações, que não se formaram fases cristalinas nas amostras não aditivadas (o que foi confirmado pelos difratogramas das Figuras 5.32 e 5.37) e, ao contrário, nelas se formaram fases vítreas que, apesar de “tamponar” vazios e, portanto, inibir o surgimento de elevados valores das AAs, acabaram por provocar elevados valores de EPU.

Quanto às massas aditivadas com carbonato de cálcio, constata-se, através das mesmas Figuras 5.49 e 5.50 e através dos difratogramas das Figuras 5.33, 5.34, 5.38 e 5.39, que apesar de a elevação das temperaturas de queima não ter provocado sistemática redução das AAs, elas acabaram por formar, no entanto, fases cristalinas (augita), as quais certamente inibiram o surgimento das EPU.

Quanto à influência das adições magnesianas, as já referidas Figuras 5.49 e 5.50 indicam o surgimento de elevadíssimos valores das AAs decorrentes da ação das temperaturas de queima (bem maiores do que as AAs decorrentes das adições calcárias), às quais corresponderam efetiva e sistemática tendência a elevados valores das respectivas EPU, já que, como consequência das altíssimas AAs, elevada quantidade de fases amorfas e/ou vítreas tornaram-se facilmente hidratáveis, o que, a propósito, acabou por reforçar a expectativa de maiores EPU das misturas magnesianas, já que estas, quando comparadas com as misturas calcárias, apresentaram maiores percentuais de perda de massa após a queima aos 1000°C, fato já relatado e comentado no item 5.2.2.4; é muito provável, portanto, diante de tais constatações, que a formação das fases cristalinas (enstatita e ringwoodita) decorrentes da ação das adições magnesianas, ocorrência constatada através dos difratogramas das Figuras 5.36, 5.37, 5.40 e 5.41, não tenha reduzido de forma significativa o efeito das elevadíssimas AAs (além da ação expansiva da brucita), dado que estas elevadíssimas AAs devem em muito ter facilitado o acesso de grande quantidade de água às suas fases amorfas e/ou vítreas.

A propósito dos elevados valores das AAs decorrentes das adições magnesianas, compare-se o valor limite de 30% a elas relativo, com o valor limite de 16% concernente às AAs provenientes das adições calcárias e, para tanto, sejam analisadas e confrontadas as Figuras 5.49 e 5.50.

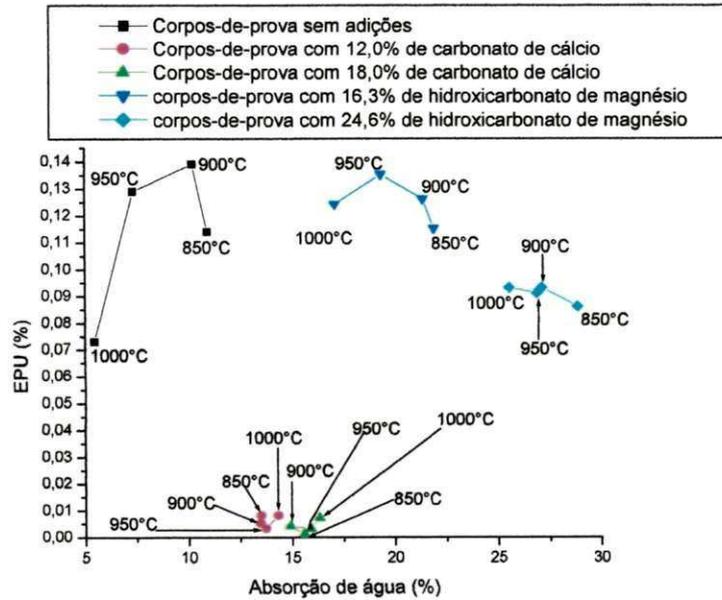


Figura 5.49 EPU versus absorção de água dos blocos autoclavados da Cerâmica "A"

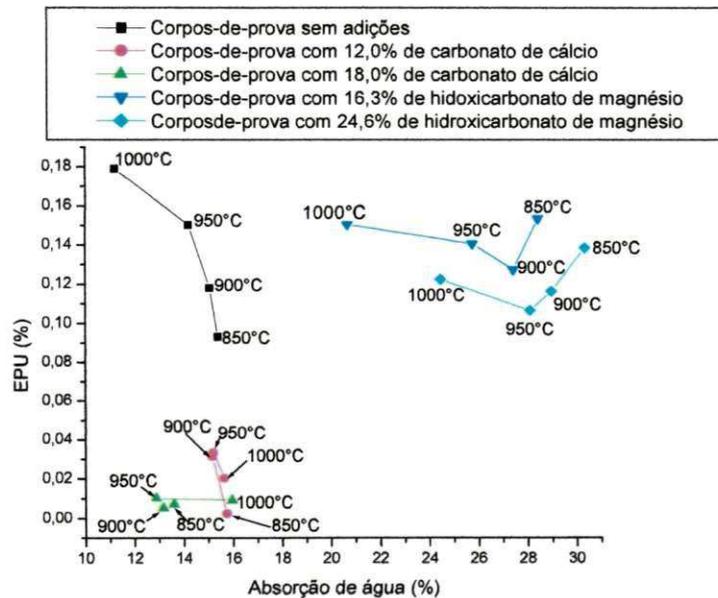


Figura 5.50 EPU versus absorção de água dos blocos autoclavados da Cerâmica “B”

Os elevados valores das AAs decorrentes do emprego das adições magnesianas devem estar relacionados com a reduzida massa molar destas adições, as quais, ao serem aferidas em “peso”, geraram grandes volumes (bem maiores do que os respectivos volumes das adições calcárias relativas a “pesos” idênticos). Estes grandes volumes de hidroxicarbonato de magnésio, ao ser submetido à temperatura correspondente ao desprendimento do CO₂, acabaram por gerar grande quantidade de poros.

Apesar de os resultados aqui apresentados não deixarem dúvidas quanto à complexidade da correlação entre a EPU e a absorção de água (com ênfase à variação das temperaturas de queima) sobre as características dos corpos cerâmicos, pode-se, no entanto, no que se refere às adições calcárias, estimar tendências da ordem de grandeza das EPU através da associação entre os valores das AAs e a variação da temperatura, já que ao aumento desta se admita a formação gradual de fases cristalinas (decorrentes das reações devidas à presença das adições calcárias), e a conseqüente redução de superfície específica, bem como o desprendimento de CO₂ a partir das temperaturas próximas dos 850°C. Tal constatação ratifica hipótese já consagrada na literatura.

No que se refere às adições magnesianas, a lentidão da formação cristalina associada à comprovada formação da brucita, devem ter respondido pela pouca (ou mesmo inexistente) redução de EPU, embora o elevado desprendimento de CO₂ justifique os já citados e comentados valores das AAs. Tais hipóteses vão ao encontro de constatações já aceitas pela literatura.

5.2.2.6 Correlação entre a EPU e a absorção de água dos blocos autoclavados (com ênfase às alterações devidas à ação dos teores das adições)

As figuras constantes deste item procuram oferecer uma visão ampla da correlação entre vazios permeáveis e a EPU; aqui não se considera a ação específica de cada uma das temperaturas de queima, mas, apenas, a consequência ampla da tendência da ação por elas exercida na correlação EPU x AA. Assim considerando, constata-se, através da Figura 5.51, que para as amostras da Cerâmica “A”, concernentes às adições calcárias, ocorreu uma EPU mínima, praticamente invariável, correspondente a todas as temperaturas de queima, e independente, pelo já exposto, do teor da adição considerada. A esta EPU mínima, praticamente invariável, corresponderam valores de AA que mantiveram uma mesma ordem de grandeza.

Quanto às amostras autoclavadas da Cerâmica B, e também submetidas à ação de adições calcárias, constatou-se, através da Figura 5.52, mais uma vez, e para o teor de 18,0% de adição, a existência de uma EPU mínima comum a todas as temperaturas de queima, embora com uma larga amplitude de valores das respectivas AAs.

No que tange as amostras autoclavadas com adições magnesianas, as Figuras 4.53 e 4.54 respectivamente relativas às Cerâmicas “A” e “B”, demonstra, sob evidente tendência, o que se verificou com as amostras autoclavadas com adições calcárias da Cerâmica “A”.

A Figura 5.51 indica que para a massa da Cerâmica “A” à qual se incorporou o carbonato de cálcio, foi marcante a interferência deste nos valores das EPU e das AAs, os quais mantiveram valores praticamente constantes que independem da temperatura de queima considerada. Isto posto, verifica-se que para o teor de 12,0% de adição calcária, independentemente da temperatura de queima, as AAs se apresentaram entre 13,5% e 14,5%, e para o teor de 18,0% de adições calcárias, também independentemente da temperatura de queima, as AAs se apresentaram entre 15,0 e 16,5%. Para teor nulo de adição, as EPU, bastante elevadas, corresponderam a valores reduzidos de AAs.

A influência da adição sobre as EPU e sobre as AAs da Cerâmica “A”, analisada através da citada Figura 5.51, não se deu de forma idêntica em relação à massa da Cerâmica “B”, conforme pode ser depreendido da comparação entre a citada Figura 5.51 e a Figura 5.53. Através desta última, percebe-se, no que tange a Cerâmica “B”, que aos teores elevados de adição calcária (18,0%), as EPU e as AAs apresentaram valores praticamente constantes, o que deixou de acontecer em relação à adição calcária de 12,0%.

Destaque-se, neste contexto, o comportamento quase linear da relação EPU x AA relativa ao teor nulo de adição das massas “A” e “B”.

A ação diferenciada das adições calcárias, fato indicado nas Figuras 5.51 e 5.52, deixa evidente o quanto as características inerentes a cada uma das massas utilizadas interferem na relação EPU x AA, sendo perceptível, no entanto, a ocorrência de casos em que é reduzida a amplitude de variação de seus valores, independentemente da temperatura de queima empregada. Constata-se, pois, a existência de situações em que chega a ser desprezível a interferência das temperaturas de queima na ocorrência da EPU ou da AA, evidenciando-se o teor da adição como o único parâmetro interferente nos seus valores (Figura 5.51), e constata-se, também, a existência de casos em tal fato ocorre para determinados teores de adição, tal como evidenciado na Figura 5.52, para teores de 18,0 % de adições também calcárias.

As Figuras 5.53 e 5.54 também demonstram que as EPU e as AAs (estas últimas, sobretudo) sofreram a interferência marcante do teor das adições magnesianas, embora de forma menos evidente do que foi observado através das Figuras 5.51 e 5.52, referentes às adições calcárias.

Se poucas são as evidências conclusivas indicadas nas citadas Figuras 5.53 e 5.54, uma delas não deixando de ser marcante, qual seja, o aumento das AAs decorrente das incorporações magnesianas às massas da Cerâmica “A” e da Cerâmica “B”.

As Figuras 5.53 e 5.54 (de forma mais pronunciada a Figura 5.54) insinuam uma passagem gradual de redução de EPU e aumento de AA, decorrente da variação de 16,3 para 24,6% de incorporação de hidroxicarbonato de magnésio

Tal como já constatado em relação às adições calcárias, a variação das EPU e AAs devidas às adições magnesianas, e para o ciclo de queima considerado, parecem estar muito mais relacionada com o teor destas do que com as temperaturas de queima empregadas na confecção dos corpos-de-prova.

A propósito do assunto ora em tela, recorde-se que Lira (1997) admite que a absorção de água reflete as transformações térmicas durante a queima dos corpos-de-prova e, para justificar tal conclusão, a referida pesquisadora afirma que a redução da absorção de água ocorre com o aumento da temperatura de queima; a redução da absorção de água se dá como consequência de uma densificação do material, em decorrência da coalescência das partículas e formação da fase líquida, e esta, formada durante a sinterização, tem diminuída a sua viscosidade à medida que aumenta a temperatura, o que lhe permite preencher os vazios entre as partículas e reduzir a porosidade da peça. Corpos menos porosos apresentam diminuição da absorção de água, pois reduzem a sua porosidade aberta, conclui aquela autora.

A afirmação de Lira (1997), acima referida, se constitui na hipótese clássica segundo a qual se admite a estreita correlação entre a temperatura de queima e a absorção de água, a qual parece se contradizer com as constatações que neste trabalho foram discutidas através da análise das Figuras 5.51 e 5.52 (as AAs se mantiveram praticamente constantes, independentemente da temperatura de queima, após as adições). A situação é, no entanto, contraditória apenas na sua aparência, pois as considerações de Lira (1997), que ratificam os resultados de estudiosos que a precederam, partem do princípio de que os fenômenos que regem a AA estão relacionados a temperaturas bem mais elevadas do que aquelas consideradas nesta tese, as quais, compatíveis com a confecção de blocos destinados à construção civil, não ultrapassaram os 1000°C. Assim sendo, deve-se admitir que não houve energia térmica suficiente para a formação de elevados valores de fases líquidas a baixas temperaturas, e que as considerações apresentadas no presente estudo partem do princípio segundo o qual a variação de AA se deu em função do grau de retenção das adições incorporadas às massas argilosas.

Sabe-se que aos 1000°C se formaram fases cristalinas, conforme foi detectado nos difratogramas apresentados nesta pesquisa (augita nas adições calcárias, e enstatita, ringwoodita e brucita nas adições magnesianas), o que deve ter contribuído de forma diferenciada nos valores das AAs e das EPU's a esta temperatura (1000°C), abaixo das quais o parâmetro fundamental a reger tais propriedades foi a quantidade de vazios gerados pelo desprendimento do CO₂ das adições calcárias e magnesianas.

A respeito da complexidade da relação entre a EPU e a AA, (em que se dê ênfase à ação dos teores das adições), Menezes et al (2006), ratificando estudos de pesquisadores que os precederam, admitiram que tal relação é altamente dependente de parâmetros cujo

grau de complexidade impede a sua indicação em um modelo abrangente, devendo cada caso, portanto, ser analisado através das peculiaridades que os envolvam.

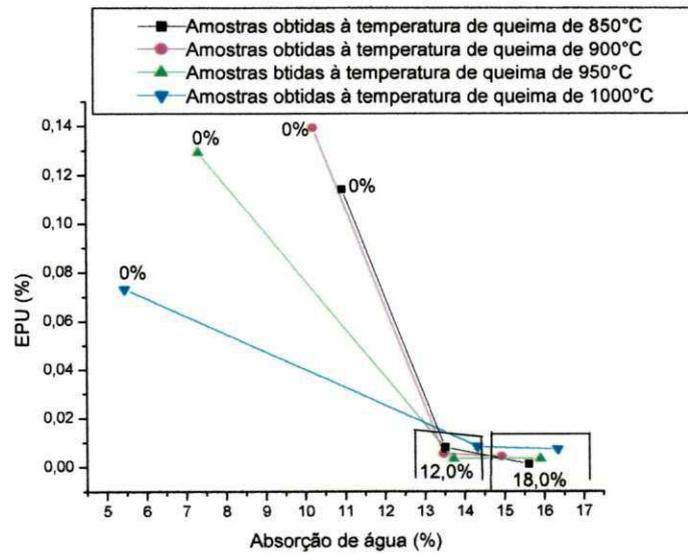


Figura 5.51 Absorção de água versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “A” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições calcárias

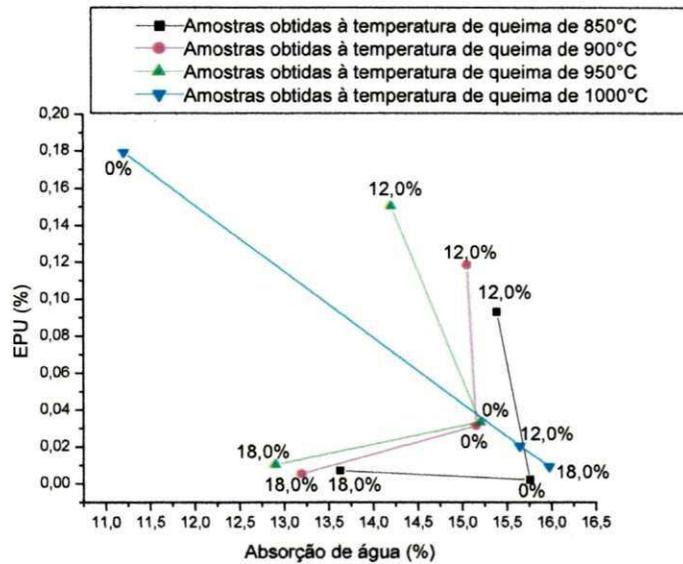


Figura 5.52 Absorção de água versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “B” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições calcárias

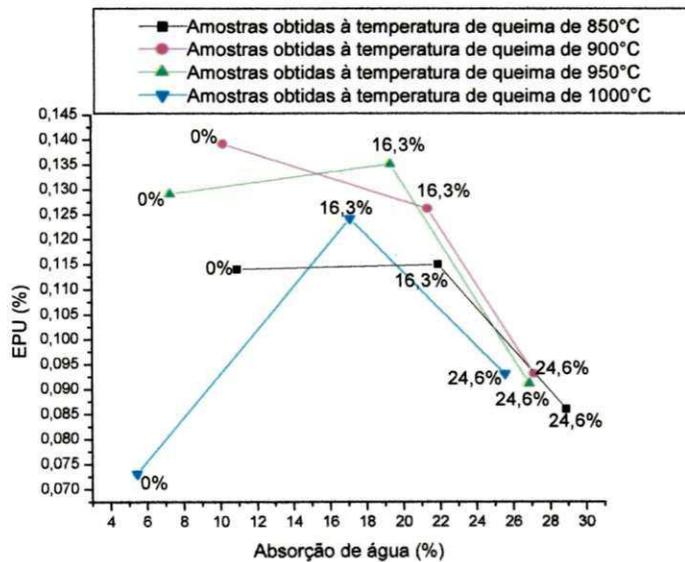


Figura 5.53 Absorção de água versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “A” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições magnesianas

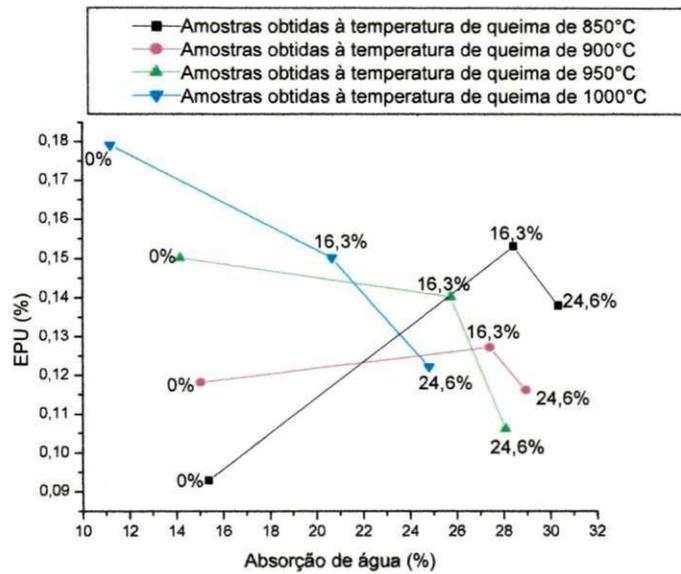


Figura 5.54 Absorção de água versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “B” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições magnesianas

5.2.2.7 Correlação, ao longo do ciclo da queima, entre a EPU e a resistência mecânica dos blocos autoclavados

As Figuras 5.55 e 5.56, relativas às adições calcárias, indicam que a ausência destas implica, sistematicamente, em valores máximos de EPU e valores mínimos de resistências mecânicas.

Quanto à redução da EPU devida à incorporação do carbonato de cálcio, a literatura praticamente não mais a contesta dada as evidências da formação de fases cristalinas de aluminossilicatos cálcicos (tal como a augita detectada neste estudo) decorrente da presença de tal adição, e quanto aos valores máximos de resistências mecânicas verificados após a incorporação das adições calcárias, pode-se justificá-los a partir da seguinte associação de idéias:

a) a presença de teores de adições calcárias possibilita a formação de fases cristalinas RODRIGUES (2002) (conforme se verificou neste estudo com a detecção da augita);

b) as fases cristalinas apresentam área específica menor do que a área específica das fases amorfas e vítreas (estas últimas sobretudo após a inevitável lixiviação de íons) MENEZES (2005):

c) a resistência mecânica é inversamente proporcional ao tamanho dos cristais individuais da microestrutura do material considerado (inversamente proporcional à área específica, portanto) LIRA (1997).

Quanto às Figuras 5.57 e 5.58, relativas às adições magnesianas, torna-se bem evidente que, para estas adições, as mais elevadas resistências são decorrentes da ação da mais elevada temperatura de queima (1000°C), embora nem sempre aos valores máximos de resistência mecânica correspondam os valores mínimos das EPU.

Ainda através das Figuras 5.57 e 5.58, fica patente a preponderante interferência da mais elevada temperatura de queima considerada neste estudo (1000°C) como o parâmetro que, associado ao teor de 16,3% de incorporação de hidroxicarbonato de magnésio, responde pela resistência máxima relativa à adição magnesiana; já no que se refere à influência indefinida das temperaturas de queima inferiores a 1000°C sobre a redução dos valores da EPU e/ou sobre a efetiva tendência de aumento da resistência mecânica das misturas magnesianas, pode tal oscilação ser atribuída à tendência apresentada pelo MgO de permanecer na fase amorfa, conforme já referido por Lira (1997), o que dá ensejo a se admitir que sob temperaturas de queima inferiores a 1000°C a formação cristalina não seja sempre a prevalecente; o evidente e já referido aumento da resistência mecânica dos corpos-de-prova obtidos com adições magnesianas à temperatura de queima de 1000°C é, portanto, o indício de que abaixo de tal temperatura não se tornou efetivamente marcante a interferência das fases cristalinas enstatita e ringwoodita, e, embora sob a ação da referida temperatura de 1000°C as EPU não sejam sistematicamente as mínimas, destas, porém, se aproximam os blocos moldados com o teor máximo de incorporação magnesiana considerado (24,6%).

As adições magnesianas, portanto, não apresentam o mesmo grau de previsibilidade indicado pelas adições calcárias no que tange a associação entre as EPU e as resistências mecânicas obtidas sob as mesmas condições de tratamento dispensadas aos blocos cerâmicos.

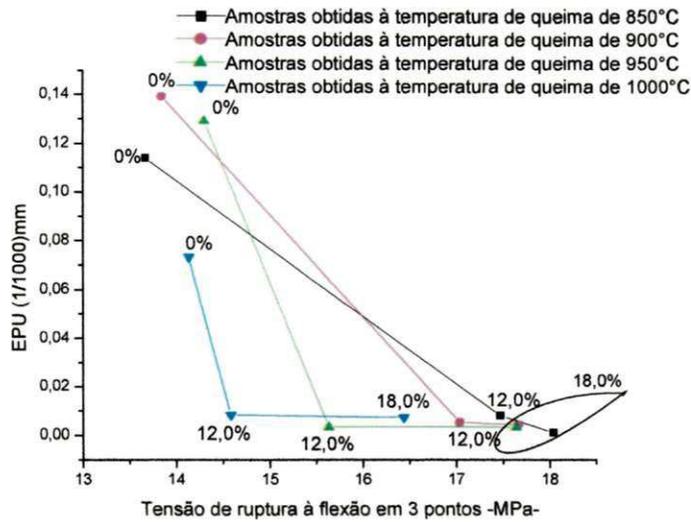


Figura 5.55 Resistência à flexão versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “A” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições calcárias

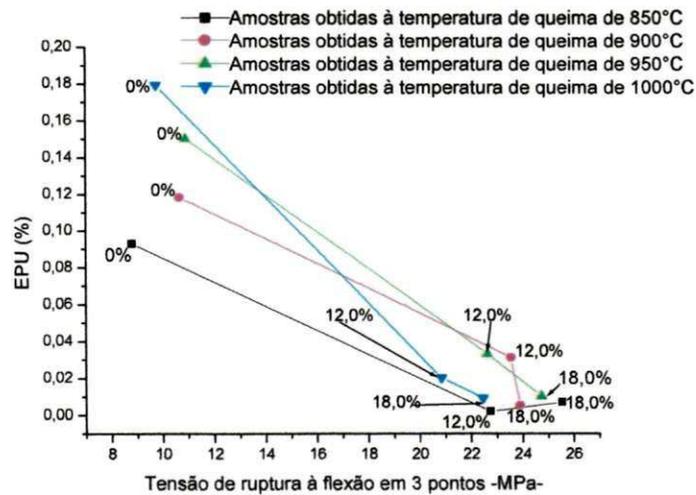


Figura 5.56 Resistência à flexão versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “B” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições calcárias

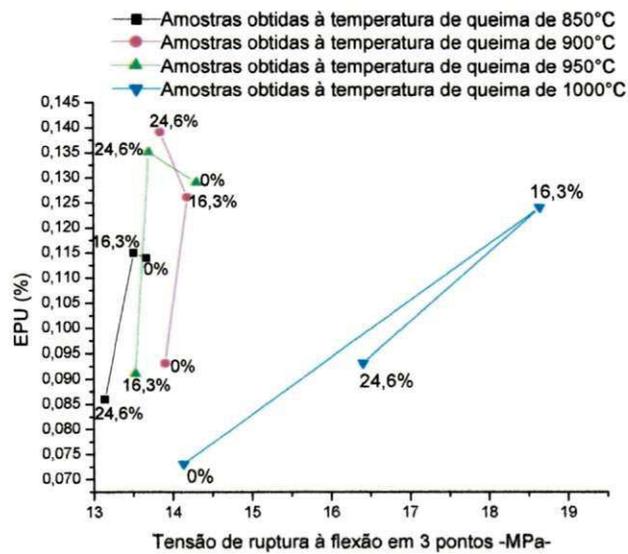


Figura 5.57 Resistência à flexão versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “A” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições magnesianas

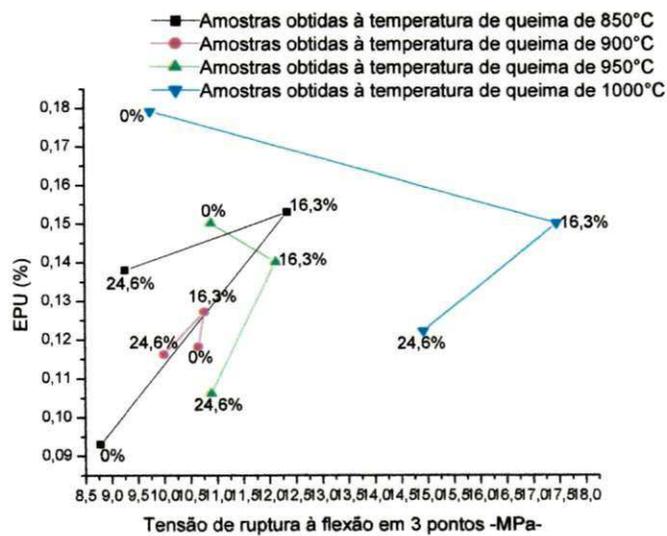


Figura 5.58 Resistência à flexão versus EPU dos blocos autoclavados da Cerâmica “B” moldados ao longo do ciclo da queima sem adição e com adições magnesianas

5.2.2.8 Correlação entre a EPU e o efeito da autoclavagem sobre corpos-de-prova obtidos a diferentes temperaturas de queima

As Figuras 5.59, 5.60, 5.61 e 5.62 indicam uma tendência praticamente universal para o aumento das EPU após a ação da autoclavagem, fato que ratifica o que já fora constatado por Young e Brownell (1959), os quais, ao admitirem que a ordem de grandeza da EPU em um determinado momento está correlacionada com a quantidade de água adsorvida até o instante considerado, indiretamente admitiram o aumento de tal fenômeno expansivo após a ação da autoclavagem, já que este processo aumenta o teor de água adsorvida proveniente de vapores, através das elevação de temperatura e pressão transmitidas ao corpo cerâmico considerado; destaque-se, a propósito, que na realidade a autoclavagem apenas tenta antecipar estágios de EPU, “prevendo-a” para um determinado momento da vida útil do corpo cerâmico considerado.

De uma forma mais evidente, Young e Brownell (1959) ainda se pronunciam a respeito do assunto ora tratado e, explicitamente, afirmam que ao se aumentar a temperatura ou a pressão (podendo também ser entendida como concentração) do vapor de água em contato com a peça, certamente será aumentada a velocidade com que a água é adsorvida por esta.

Estudos há que tentam relacionar a EPU determinada sob diferentes graus de severidade da autoclavagem com o tempo que seria necessário para se atingir a mesma EPU em condições ambientes de pressão e temperatura.

Ainda em relação às figuras 5.59, 5.60, 5.61 e 5.62, percebe-se que além da verificação da efetiva influência da autoclavagem no processo de aceleração das EPU (o que já se constitui em importante constatação), outras “leis” não se evidenciam de forma explícita, embora se verifiquem algumas tendências, tais como:

a) o aumento das EPU das amostras autoclavadas e queimadas entre os 950 e 1000°C e obtidas com o emprego da massa “A” com adições calcárias, tendência que se inverte quando se emprega, em idênticas condições, a massa “B” (Figuras 5.59 e 5.60);

b) a inversão da tendência citada no item a, ou seja, a redução (ou quase estagnação) das EPU das amostras autoclavadas e queimadas entre os 950 e 1000°C e obtidas com o emprego da massa “A” com adições magnesianas, tendência que se inverte quando se emprega, em idênticas condições, a massa “B”. (Figuras 4.60 e 4.61)

Inferese que a influência diferenciada da ação da autoclavagem está relacionada com as características inerentes às diversas massas e adições empregadas, do que resultarão diferentes valores de água adsorvida.

Lira (1997) deixa implícita a dificuldade para se definir um modelo universal que correlacione a EPU “atual”, obtida em condições ambientes de pressão e temperatura, com a EPU “futura” e, nesse sentido, afirma que tal modelo deveria levar em conta a temperatura de sinterização, bem como todas as implicações inerentes à microestrutura que afetam o corpo cerâmico a ser ensaiado. Fica evidente que Lira (1997) admite a possibilidade da inexistência de uma relação que possibilite, de forma plena, a efetiva antecipação da EPU “potencial”.

Ainda a propósito deste assunto, Bauer (2001) afirma que as correlações entre os valores de EPU obtidos em autoclave e os seus resultados obtidos em condições ambientes de temperatura e pressão são bastante variáveis e deveriam ser estabelecidas caso a caso, pois podem se alterar com a natureza da cerâmica e com a maior ou menor presença de poros na mesma. Concluindo, o citado pesquisador admite que o ensaio acelerado é aceito normalmente devido à dificuldade prática de se realizarem ensaios em condições normais ao longo de meses e anos.

À conclusão apresentada por Bauer (2002), pode-se acrescentar que o ensaio por ele designado como “acelerado” (em autoclave) é aceito pelo fato de trazer consigo elevado coeficiente de segurança, pois não há dúvidas acerca dos resultados de EPUs superestimados quando definidos através da autoclavagem.

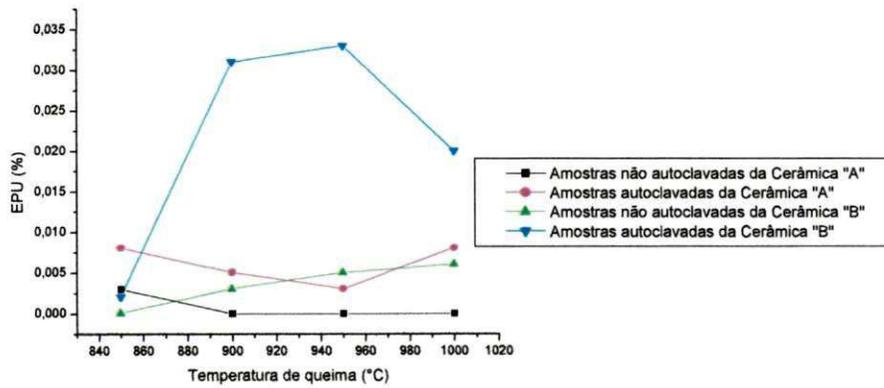


Figura 5.59 Temperatura de queima versus EPU de amostras autoclavadas e não autoclavadas das Cerâmicas "A" e "B" com 12,0% de adição calcária

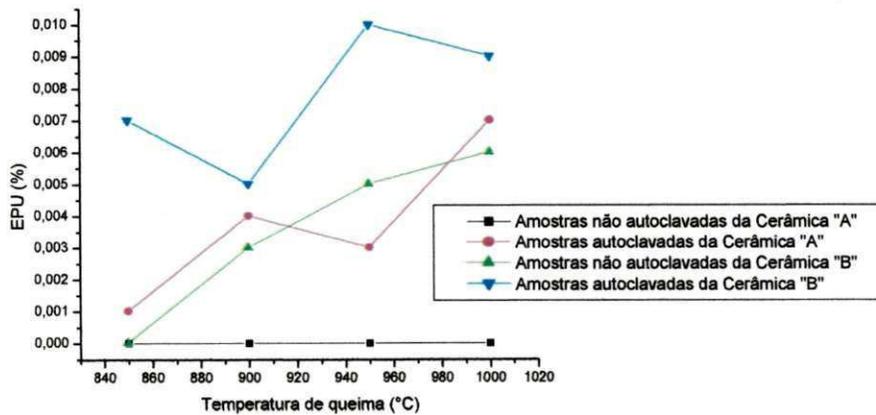


Figura 5.60 Temperatura de queima versus EPU de amostras autoclavadas e não autoclavadas das Cerâmicas "A" e "B" com 18,0% de adição calcária

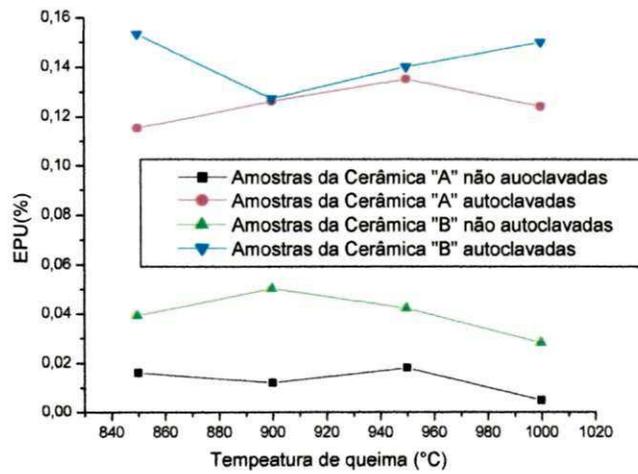


Figura 5.61 Temperatura de queima versus EPU de amostras autoclavadas e não autoclavadas das Cerâmicas "A" e "B" com 16,3% de adição magnésiana

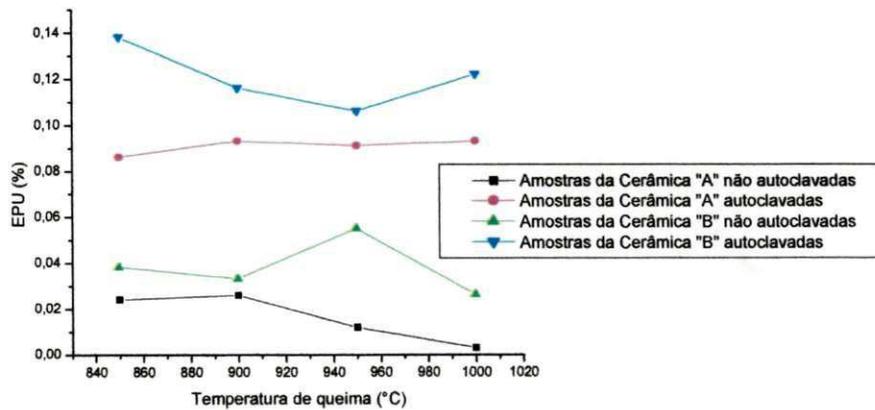


Figura 5.62 Temperatura de queima versus EPU de amostras autoclavadas e não autoclavadas das Cerâmicas "A" e "B" com 24,6% de adição magnésiana

CAPÍTULO 6

Conclusões

6.1 Conclusões concernentes aos objetivos específicos

Os trabalhos que se desenvolveram ao longo do estudo ora concluído identificaram marcos de referência no direcionamento da pesquisa voltada à EPU e à sua correlação com as propriedades químico-físicas e mineralógicas dos blocos analisados e, dentre as principais constatações, destacam-se as abaixo discriminadas:

a) quanto às propriedades mineralógicas das massas “A” e “B” sobre o fenômeno da EPU:

- o teor do quartzo livre da massa da Cerâmica “A” é 31% superior ao teor do quartzo livre da massa da Cerâmica “B” ;

- através da “análise racional”, estimou-se como desprezível o teor de feldspato da Cerâmica “A” quando comparado com o teor de feldspato da Cerâmica “B”;

- ainda através da “análise racional”, estimou-se o teor de argila da Cerâmica “B” 29% superior ao teor de argila da Cerâmica “A”, valor este que foi confirmado através da difração a “laser”;

| - através da difração a “laser” detectaram-se idênticos teores de areia para as Cerâmicas “A” e “B”, e teor de silte da primeira 32% superior ao teor de silte desta última;

| - através da “análise racional”, constatou-se que a massa da Cerâmica “A” apresentou relações $(N + K)/A$ e $(N + K)/S$ com valores 93% e 90% respectivamente superiores às idênticas relações da Cerâmica “B”, e apresentou a relação A/S 33% inferior à idêntica relação da Cerâmica “B”, embora com o valor absoluto de álcalis reduzido para ambas as Cerâmicas.

b) quanto ao efeito das adições calcárias e magnesianas no comportamento microestrutural dos corpos analisados:

- à temperatura de queima de 1000°C foi detectada a formação da fase cristalina augita, a qual, muito provavelmente, respondeu pela significativa e sistemática redução das EPU decorrentes da ação das adições calcárias;

| - à temperatura de queima de 1000°C, foram detectadas, sob efeito das adições magnesianas, as fases cristalinas enstatita e ringwoodita, esta última apenas na massa “B”,

como também a brucita, a qual é freqüentemente citada na literatura como geradora de elevadas expansões.

c) quanto ao efeito das adições calcárias e magnesianas sobre a correlação entre a EPU e a perda de massa dos corpos queimados a 1000°C e autoclavados:

- as perdas de massa, entre os 1000 e 1000°C, decorrentes da adição magnesiana foram da ordem de 55% superiores às perdas de massa, ao longo do mesmo intervalo de temperaturas, decorrentes da adição calcária.

d) quanto ao efeito das adições calcárias e magnesianas sobre a absorção de água de blocos cerâmicos obtidos ao longo do ciclo de queima e autoclavados:

- as adições calcárias promoveram, para a Cerâmica "A" e ao longo de todo o ciclo da queima, a sistemática redução, para valores praticamente constantes, das EPUs (próximos de valores nulos), e o sistemático aumento para valores também praticamente constantes das absorções de água;

- as adições calcárias também promoveram, para a Cerâmica "B", a sistemática redução dos valores das EPUs, e a discreta tendência para a redução dos valores das absorções de água;

- as adições magnesianas, para as Cerâmicas "A" e "B", mantiveram a ordem de grandeza dos valores das EPUs, e promoveram sistemático e considerável aumento das absorções de água;

- fica ratificada a afirmação de Menezes (2006), para quem a relação entre a EPU e a absorção de água é de tal maneira dependente da composição química da massa empregada e das diferentes reações decorrentes da sua interação com as adições, que se torna impossível a definição de um modelo abrangente que possa correlacionar tais parâmetros, devendo-se analisar, para cada caso, as características peculiares que envolvem tais correlações.

e) quanto ao efeito das adições calcárias e magnesianas sobre a resistência mecânica dos blocos autoclavados obtidos a diferentes temperaturas de queima:

- os blocos moldados com o emprego das adições calcárias demonstraram, ao longo de todo o ciclo da queima, a marcante e sistemática tendência de aumento da resistência mecânica e redução das respectivas EPUs;

- os blocos moldados com o emprego das adições magnesianas demonstraram, para as duas Cerâmicas, grande suscetibilidade ao teor de 16,3% associado à temperatura de queima de 1000°C: nesta situação, a taxa de incremento da resistência mecânica foi desproporcionalmente superior às taxas de incremento referentes a todas as outras

situações decorrentes da ação dos parâmetros “teor de adição” versus “ temperatura de queima”.

- ainda em relação aos blocos moldados com o emprego das adições magnesianas, não foi detectada correlação evidente entre os valores das EPU e os valores das respectivas resistências mecânicas, sendo perceptível, no entanto, para a Cerâmica “A”, reduzida amplitude de valores das resistências mecânicas em confronto com a elevada amplitude de valores das respectivas EPU, excetuando-se, quanto a esta constatação, a temperatura de 1000°C.

f) quanto à ação da autoclavagem sobre a EPU de blocos cerâmicos com adições calcárias e magnesianas ao longo do ciclo da queima:

- a) a autoclavagem promoveu, de forma praticamente universal, o sistemático aumento da EPU, sem, no entanto, gerar correlações de resultados que sugiram um modelo que correlacione “temperaturas de queima” versus “autoclavagem” do qual resultasse a previsão de incremento da EPU.

6.2 Conclusões concernentes ao objetivo geral

- As adições calcárias promoveram, praticamente para todo o ciclo de queima considerado, significativa redução das EPU, chegando a praticamente anulá-las em relação à Cerâmica “A”,

- as adições magnesianas promoveram um comportamento oscilante em relação à redução das EPU, com os seus valores, para algumas faixas de temperatura de queima, chegando a aumentar; quando houve reduções de EPU, estas foram, via de regra, inexpressivas;

- as adições calcárias promoveram o surgimento da fase cristalina augita, o que contribuiu, de forma evidente, para a redução da EPU dos corpos-de-prova moldados com o seu emprego;

- as adições magnesianas, promoveram o surgimento de fases cristalinas, dentre as quais a brucita, fase esta que deve ter contribuído para o efeito oscilante (nem sempre redutor), da EPU dos corpos-de-prova moldados com o seu emprego;

- para a faixa de temperaturas considerada neste estudo, ao contrário do que ocorreu com as adições calcárias, as adições magnesianas não se mostraram aconselháveis como veículo redutor de EPU, nem se evidenciaram, com o seu emprego, tendências que apontassem para a melhoria das características dos blocos cerâmicos quando analisados através do prisma da construção civil.

CAPÍTULO 7

Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 7181 (1984) – Solo: Análise granulométrica.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 13818 (1999) – Placas cerâmicas para revestimentos: Especificação e métodos de ensaio.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 8947 (1985) – Telha cerâmica: Determinação da massa e da absorção de água.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 6461 (1983) – Bloco cerâmico para alvenaria: Verificação da resistência à compressão.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 6459 (1984): Solo: Determinação do limite de liquidez.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 7180 (1984) – Solo: Determinação do limite de plasticidade.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica – NBR 15270-3 (2005) – Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação: Determinação do índice de absorção de água.
- AS 1226.5 (1984) – Australian Standards – Methods of sampling and testing clay building: Method for determining characteristic expansion.
- ACCHAR, W – Materiais cerâmicos, Ed. Da UFRN, Natal – 2006.
- AMERICAN STANDARD ASTM C 1161 (1994)–Standard test method for flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature.
- AMERICAN STANDARD ASTM C 370-56 (1994)–Standard test for moisture expansion of fired whiteware products.
- ARANTES, N. – Sistema de gestão empresarial, Ed. Atlas, São Paulo – 1994.
- ARAÚJO, A. P. R. – Estudo tecnológico de algumas argilas do estado de Pernambuco, bacia do Capibaribe – *Cerâmica* **20** (77), 18 – 1974.

- AS 1226.5 (1984) – Australian Standard – Methods of sampling and testing clay building bricks: Method for determining characteristic expansion.
- ATECEL – Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior – Causas do desabamento do bloco “B” do conjunto residencial “Enseada de Serrambi – Bultrins - Olinda” – UFPB, Campina Grande – 1990.
- BALDO, J. B et al – Parâmetros relevantes na normalização de blocos cerâmicos para alvenaria – Congresso Brasileiro de Cerâmica – Blumenau – 1997.
- BAUER, R.J.F e RAGO, F. – Expansão por umidade de placas cerâmicas para revestimentos – Cerâmica industrial 5 (3) 41, 2000 .
- BESOAIN, E. – Mineralogía de arcillas de suelos – CIDIA – Centro interamericano de documentación e información agrícola – São José da Costa Rica – 1985.
- BODIN, C. – Technologie des produits de terre cuite, Gauthier-Villaars, Paris – 1956.
- BOWMAN, R. – Melhorando a precisão das determinações da expansão por umidade – Cerâmica industrial 1 - 1996.
- BOWMAN, R. – Moisture expansion kinetics as a function of conditioning – WWW.INFO TILE.COM. AU – 1999.
- BOWMAN, R. e WESTGATE, P. – In Proc. Int. Ceram.Conf.; Austceram 94, Sidney, 1994
- BRADSTREET, S.W – Ceramics, Bull.Amer. Ceram.Soc. 37 .- 1958.
- BRINDLEY, G. W. e UDAGAWA, S. – High temperature reactions of clay mineral mixtures and their ceranic properties: I, Kaolinite-mica-quartz mixture with 25 weight % quartz, J. Am. Ceram. Soc., 43 (2) 59 – 1960.
- BS 6431 (1984) – British Standard – Method for determination of moisture using boiling water: unglazed tiles.
- CALLISTER, William D – Ciência e engenharia de materiais, LTC Editora, 2002, Rio de Janeiro.
- CAMPOS, L. F. A – Estudo da expansão por umidade (EPU) em blocos cerâmicos do estado da Paraíba – Dissertação de mestrado – UFCG – Campina Grande – 2002.
- CAPUTO, H. P. – Mecânica dos solos e suas aplicações, LTC Editora, 1988, Rio de Janeiro..

- CHIARI et al – Expansão por umidade – Partes I e II – Cerâmica Industrial **6 e 35** – 1996.
- COLE, W e BANKS, J. P. – Studies on the moisture expansion of monocottura floor tiles of Australian manufacture, Key Engineering materials – **53-55** 185 - 1991.
- COLE, W – Moisture expansion of a ceramic body and its internal surface area, Nature, **196** (4850) 127, 1962.
- DEMEDIUK, T. e COLE, W. F. – Contribution to the study of moisture expansion in ceramic materials, J. Am ceramic soc., 43 – 1960.
- DURIEZ, M – Traité de matériaux de construction, 1º Vol., Dunod, Paris - 1950.
- FERREIRA, H. C. – Caracterização e aplicações industriais de argilas, caulins e feldspatos do nordeste brasileiro (estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte) – Tese de doutoramento – USP – São Paulo – 1972.
- FERREIRA, H. C et al – Caracterização e propriedades de argilas do Cariri paraibano – UFCG – Campina Grande – 1995.
- FRANCIULLI, G. – Revista da ANICER, ed. 44, Rio de Janeiro – 2007.
- GILSON, J.W. – The development of a cone 3 fast fire sanitary body – Thesis, Alfred University, 1982.
- GOMES, C.M., AMORIM, L.V., SEGADÃES, A.M., e FERREIRA, H.C., - Estudos preliminares visando ao uso da dilatométrica na determinação da expansão por umidade (EPU) – Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, S.P -2000.
- GOMES, C.F – Argilas (o que são e para que servem) – Fundação Calouste Gulbenkian – Lisboa – 1988.
- HERRMANN, H. Revista da ANICER, ed. 44, Rio de Janeiro – 2007.
- HOLSCHER, H.H – Effects of autoclave treatments on ceramic bodies and clays – J. Am. Ceramic, 1931.
- HOSKING, J. S. – Ceramic bodies and their chemically sorbed water, J. Am. Ceramic. Soc., **15** – 1978.
- HOSKING, J. S. e HUEBER, H. V. – Permanent moisture expansion of clays products on natural exposure, Nature, **184** (4696) 1373 – 1959.

INZIGNERI, M e FUSARINI, E – Alcune esperienze di invecchiamento artificiali su paste di terraglia forte. Riduzione degli nocivi mediante l'aggiunta do correttivi, trans. VII International ceramic congree, p. 53 - 1960.

ISO 10545-10 (1995) – International Standardization Organization – Ceramic tiles: Test methods.

KIHARA, Y et al – A microscopia do clínquer portland e seus benefícios tecnológicos – Concreto, ensino, pesquisa e realizações - IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo – 2006.

KINGERY, W.D e BOWEN, H. K – Intruduction to ceramics, John Wiley e sons inc. -2ª ed., Nova Iorque – 1976.

LIRA, C. – Efeito de carbonatos de Ca, Mg e Li e do ciclo de queima na expansão por umidade de materiais cerâmicos porosos para revestimento – Dissertação de mestrado – UFSC- Florianópolis, 1997.

LOMAX, J. e FORD, R.W. – Investigations into a method for assessing the long term moisture expansion of clay brick – Brit. Ceram. Trans. J., **82** (03) 79 – 1983.

LOYOLA, L – Revista da ANICER, ed.44, Rio de Janeiro – 2007.

MACEDO, R. S. – Estudo das matérias-primas e tijolos cerâmicos furados produzidos no estado da Paraíba – Dissertação de mestrado – UFCG – Campina Grande – 1997.

.MARINO, L. F. B. e BOSCHI, A. O. – Expansão térmica dos materiais cerâmicos – Cerâmica industrial **3** (3) – 1998.

MELLOR, J. W. – The crazing of glazed wall-tiles in service. Trans. Brit. Ceram. Soc, **36** – 1937.

MENEZES, R. R. – Estudo da expansão por umidade e de características cerâmicas correlatas de placas cerâmicas para revestimentos – Dissertação de mestrado – UFCG – Campina Grande – 2001.

MENEZES, R.R, CAMPOS, L.F, FERREIRA, H.S, FERREIRA, H.C – Cerâmica Industrial, **10** (2), 2005.

MERRIT, G.E. e PETERS, C.G. – Interferometer measurements of the thermal dilation of glazed ware – J. Amer ceramic soc. - 1926

MILNE, A. A. – Expansion of fired kaolin when autoclaved and effect of additives, Brit. Ceram. **57** – 1958.

MIRANDA, F.S. – Estudo da expansão por umidade e da resistência mecânica dos tijolos do edifício Aquarela, Jaboatão dos Guararapes – Dissertação de mestrado, UFPB, 2001 – Campina Grande.

MOTHÉ, C.G. e AZEVEDO, A.D. – Análise térmica de materiais – Editora , São Paulo - 2002.

NORTON, F. H. – Introdução à tecnologia cerâmica – Edgard Blucher Ltda Editora, São Paulo – 1973.

PADILHA, A. F e AMBRÓSIO FILHO, F. – Técnicas de análise microestrutura. Edit. Hemus, São Paulo - 2007.

PALMER, L.A – Volume changes in brick masonry materials – J. Amer ceramic soc. – 1931.

PEREIRA, L.A – Materiais de construção – UFPE – Recife – 1956.

PETRUCCI, E. G. R. – Materiais de construção – Editora Globo, Porto Alegre – 1975.

PIANCA, J.B – Materiais de construção – Editora Globo, Porto Alegre – 1967.

POLE, G.R. e SCHURECHT, H.G. – Effect of water in expanding ceramic bodies of different composition – J. Am. Ceramic soc. - 1929

RAPOSO, A. E. Influência da temperatura e da metodologia de indução na determinação da expansão por umidade em placas cerâmicas para revestimentos – Dissertação de mestrado – UFCG – Campina Grande – 2003.

RIBEIRO, M. J. – Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas – Cerâmica industrial – **8** (1) – 2003.

SANTINI, P. e MORO, S.L. – Métodos de análises químicas adotadas no IPT – Publicação nº 771, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo – São Paulo – 1967.

ROBINSON, G. C. – The reversibility of moisture expansion, Am. Ceram. Soc. Bull. **64** (5) 712, - 1985.

RODRIGUES, H. – Estudo da composição de argilas naturais com diferentes teores de cálcio para utilização em revestimentos cerâmicos e seus efeitos na expansão por umidade – Dissertação de mestrado – UFCG -2002.

- SCHURECHT, H. G. – Methods for testing crazing glazes caused by increases in size of ceramic bodies – *J. Amer ceramic soc.* – 1928.
- SCHURECHT, H. G. e POLE G. R. – Effect of water in expanding ceramic bodies of different composition – *J. Amer ceramic soc.* – 1929.
- SCHURECHT, H. G. e POLE G. R. – Method of measuring strains between glazes on ceramic bodies – *J. Amer ceramic soc.* – 1930
- SEGADÃES, A.M., CARVALHO, M.A. e FERREIRA, H.C. – Moisture expansion interpreted in terms of phase equilibrium diagrams – *Am. Ceramic soc. Bull* – 2003.
- SMITH, A. N. – *Trans. Brit. Ceram. Soc.* 54300 (1955)
- SOUZA, J. – Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz – Tese de doutorado – UFCG – Campina Grande – 2008.
- SOUZA SANTOS, P. – *Ciência e tecnologia das argilas, vol.1*, Edgard Blücher Ltda, São Paulo – 1989.
- SOUZA SANTOS, P. – *Ciência e tecnologia das argilas, vol.2*, Edgard Blücher Ltda, São Paulo – 1992.
- TEIXEIRA, R A. – *Cerâmica industrial*, 7, 3 – 2002.
- THIMECKE, H. – Thermal and moisture expansion of kaolins and bodies fires to different temperatures, *J. Am. Ceramic soc.*, **24**, 1941
- THOMAZ, E. – *Materiais cerâmicos para a construção civil*, USP, São Paulo.
- VAN VLACK, L. H. – *Princípios de ciência e tecnologia dos materiais*, Ed. Campos, Rio de Janeiro – 1998.
- VARGAS, M. – *Introdução à mecânica dos solos*, Mcgraw-Hill do Brasil, Ed., São Paulo - 1978.
- VAUGHAN, F. e DINSDALE, A. – Adsorption and desorption of moisture in fires ceramic materials, *Nature*, **183** – 1959.
- VAUGHAN, F e DINSDALE, A – Moisture expansion, *trans. Brit. Ceram. Soc.* **61** (1) 1, 1962.
- VERÇOSA, E. J. – *Materiais de construção* – PUC – RS – Edit. LTC, Rio de Janeiro – 2001.

VINCENZI, P. e FIORI, C. – La cerámica, 1 / 2, 17 – 1976.

VITORIO, A. – Avaliação das características dos blocos cerâmicos utilizados nas construções da Região Metropolitana do Recife – UFPE – Recife – 1994.

WYLEN, G. V et al. – Fundamentos da termodinâmica clássica – Ed. Edgard Blücher, São Paulo – 2003.

YOUNG, J. E e BROWNELL, W. E – Moisture expansion of clay products, J.Am. ceramic soc. – 1959.

CAPÍTULO 8

Sugestões para pesquisas futuras

- Análise da evolução dos valores da EPU e das propriedades mecânicas de blocos obtidos ao longo do ciclo de baixas temperaturas de queima (de 500 a 800°C).

- Verificação do eventual surgimento de fases cristalinas em blocos queimados a baixas temperaturas (de 500 a 800°C) obtidos com massas argilosas modificadas pela adição de fundentes.

- Análise da ação sobre a EPU de blocos moldados com teores diversos de álcalis incorporados às massas utilizadas na sua obtenção a baixas temperaturas de queima (de 500 a 800°C).

- Estudos comparativos de casos de desmoronamento de prédios tipo caixão situados na Região Metropolitana do Recife.

- Estudo da EPU e das propriedades cerâmicas de blocos industrializados, e análise da sua eventual aptidão para emprego em alvenaria estrutural.