



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CAMPUS II - CAMPINA GRANDE**

**ESTUDO DA EXPANSÃO POR UMIDADE E DA RESISTÊNCIA  
MECÂNICA DOS TIJOLOS DO EDIFÍCIO AQUARELA,  
JABOATÃO DOS GUARARAPES-PE**

**FABRÍCIO DE SOUSA MIRANDA**

**CAMPINA GRANDE**

**MAIO - 2001**

**FABRÍCIO DE SOUSA MIRANDA**

**ESTUDO DA EXPANSÃO POR UMIDADE E DA  
RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS TIJOLOS DO  
EDIFÍCIO AQUARELA, JABOATÃO DOS  
GUARARAPES - PE**

**CAMPINA GRANDE - PB  
MAIO DE 2001**

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Área de Geotecnia**

**ESTUDO DA EXPANSÃO POR UMIDADE E DA  
RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS TIJOLOS DO  
EDIFÍCIO AQUARELA, JABOATÃO DOS  
GUARARAPES - PE**

**FABRÍCIO DE SOUSA MIRANDA**

Campina Grande – PB  
Maio de 2001

**ESTUDO DA EXPANSÃO POR UMIDADE E DA  
RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS TIJOLOS DO  
EDIFÍCIO AQUARELA, JABOATÃO DOS  
GUARARAPES - PE**

**FABRÍCIO DE SOUSA MIRANDA**  
Engenheiro Civil

Orientadores:

Prof. HERBER CARLOS FERREIRA, Dr.Eng.

Dissertação submetida ao curso de Mestrado em  
Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba,  
em cumprimento às exigências requeridas para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
(M.Eng.), Área de Concentração: Geotecnia.

Campina Grande - PB  
Maio de 2001



M672e Miranda, Fabrício de Sousa.  
Estudo da expansão por umidade e da resistência mecânica dos tijolos do edifício Aquarela, Jaboatão dos Guararapes - PE / Fabrício de Sousa Miranda. - Campina Grande, 2001. 82 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2001.  
"Orientação : Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira".  
Referências.

1. Geotécnica. 2. Tijolos. 3. Mecânica dos Tijolos. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Ferreira, Heber Carlos. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 624.13(043)

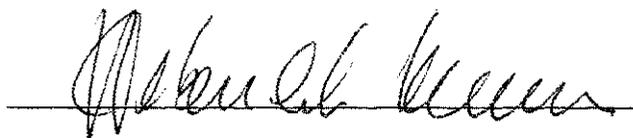
**ESTUDO DA EXPANSÃO POR UMIDADE E DA  
RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS TIJOLOS DO EDIFÍCIO  
AQUARELA, JABOATÃO DOS GUARARAPES - PE**

**FABRÍCIO DE SOUSA MIRANDA**

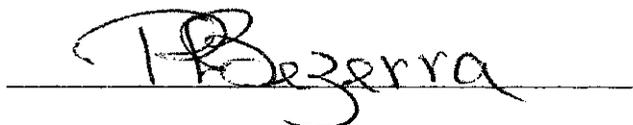
“Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração em *Geotecnia*, e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba”.

Aprovada em 31.05.2001

Banca Examinadora:



Prof. HEBER CARLOS FERREIRA, Dr.Eng. – UFPB-II  
Orientador



Prof. RAIMUNDO LEIDIMAR BEZERRA, Dr. Eng. – UFPB-II  
Examinador



Prof. HÉLIO DE LUCENA LIRA, Dr.Eng. – UFPB-II  
Examinador

## **DEDICATÓRIA**

Agradeço a Deus por tudo que tem me dado, a meus pais que sempre na medida do possível deram-me todas as condições para uma boa realização das minhas atividades profissionais e de educação pessoal, a minha esposa pela compreensão e paciência nos momentos difíceis e ao meu filho Victor pelas alegrias que me proporciona a cada dia de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por tudo.

Ao Prof. Dr Heber Carlos Ferreira pela orientação nesta dissertação.

Ao Prof. Dr Romilde Almeida de Oliveira pelos dados fornecidos e auxílio na obtenção das amostras.

Ao Prof. Dr Raimundo Leidimar pela prontidão de sempre querer ajudar.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) pelo equipamento fabricado para utilização nesta dissertação.

A ATECEL (Associação Técnica e Científica Ernesto Luiz) pela auxílio financeiro.

Ao CNPQ pela bolsa de estudos que supriu todas as despesas pessoais durante a dissertação e assim a realização deste trabalho.

A marmoraria Nossa Senhora das Neves pelos corpos de prova serrados.

Resumo da Dissertação apresentada à UFPB como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

## **ESTUDO DA EXPANSÃO POR UMIDADE E DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS TIJOLOS DO EDIFÍCIO AQUARELA, JABOATÃO DOS GUARARAPES - PE**

**Fabício de Sousa Miranda**

Maio de 2001

Orientadores:

Prof. Heber Carlos Ferreira, Dr.Eng.

Área de Concentração:

Geotecnia.

Palavras-chave:

Engenharia Civil; Geotecnia; EPU; Alvenaria; Blocos Cerâmicos.

O objetivo da pesquisa era o de determinar a Expansão por Umidade e a Resistência Mecânica à Flexão dos tijolos do Edifício Aquarela, situado em Jaboatão dos Guararapes-PE, cuja estrutura entrou em colapso em 1997. Para isto foram estudados os tijolos, o solo e a água do lençol freático da área onde estava localizada a edificação.

A expansão por umidade é um fenômeno que ocorre em alguns materiais cerâmicos que contêm silicatos anidros, que recombinados com água na forma líquida ou de vapor, têm como efeito o aumento das dimensões da peça cerâmica, de forma indefinida, numa razão não constante e que diminui com o tempo.

Para a determinação da EPU foram preparados corpos de prova com tijolos afetados e não afetados pela ação da umidade, que foram analisados pelos métodos da imersão, fervura, panela de pressão, autoclave e dilatometria que serviram para determinar da EPU atual, total e futura. Após a análise da EPU foram realizados os ensaios de resistência mecânica à flexão nos mesmos corpos de prova. Também foram preparadas amostras de tijolos moídos que serviram para a caracterização mineralógica: análise térmica diferencial,

análise termogravimétrica e difração de raios-x, foram realizadas ainda, as análises químicas da água e do solo.

Os resultados obtidos pela medição direta comprovaram o fenômeno da expansão por umidade. Os ensaios de caracterização mineralógicos e químicos não justificaram as diferenças na EPU dos tijolos afetados e os não afetados. Os ensaios de resistência mecânica à flexão mostraram que, após a “requeima” dos tijolos, ocorreu um ganho de resistência que praticamente igualou as tensões de ruptura dos corpos de prova afetados e não afetados, diferenciando-se nos corpos de prova rompidos secos e úmidos. Apenas nos corpos de prova não tratados termicamente existem evidências da perda de resistência nos tijolos afetados pela umidade.

Através do estudo da expansão por umidade seguida da avaliação da resistência mecânica à flexão, foram obtidos subsídios para comprovar que a expansão por umidade juntamente com erros de execução da obra e emprego de tijolos de má qualidade foi uma das causas principais que contribuíram para o colapso da edificação. Os resultados permitem concluir que houve uma perda de resistência mecânica devido a EPU sofrida pelos tijolos.

Abstract of Dissertation presented to UFPB as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Civil Engineering.

**STUDY OF THE MOISTURE EXPANSION AND OF THE  
MECHANICAL RESISTANCE OF AQUARELA BUILDING  
BRICKS, JABOATÃO DOS GUARARAPES - PE**

**Fabrício de Sousa Miranda**

May - 2001

Advisors:

Prof. Heber Carlos Ferreira, Dr. Eng.

Area of Concentration:

Geotechnics

Keywords:

Civil Engineering; Geotechnics; Moisture Expansion; Masonry; Ceramic Blocks.

The objective of the research was it of determining the Moisture Expansion and the Mechanical Flexural Resistance of the Aquarela Building's bricks, located in Jaboatão dos Guararapes-PE, whose structure entered in collapse in 1997. For this, were studied the bricks, the soil and the groundwater of the area where it was located the construction.

The moisture expansion is a phenomenon that happens in some ceramic materials that contain anidrous silicates, that recombined with water in the liquid form or of vapor, they have as effect the increase of the dimensions of the ceramic piece, in an indefinite way, in a reason non constant and that decreases with the time.

For the determination of moisture expansion, proof bodies were prepared with bricks affected and not affected by the action of the humidity, that were analyzed by the methods of the immersion, boiling in water, pressure cooker, autoclave and dilatometry that were to determine of current, total and future moisture expansion. After the analysis of moisture expansion the mechanical flexural resistance were accomplished in the same

proof bodies. Were also prepared samples of milled bricks that were for the mineralogical characterization: differential thermal analysis, termogravimetry analysis and X-ray diffraction, they were still accomplished, the chemical analysis of the water and soil.

The results obtained by the direct measurement they proved the phenomenon of the moisture expansion. The mineralogical characterization and chemical tests didn't justify the differences in moisture expansion of the affected bricks and the not affected. The mechanical flexural resistance tests showed that, after the "re-burning" of the bricks, happened a resistance earnings that practically equaled the tensions of rupture of the proof bodies affected and not affected, differing in the proof bodies broken dry and humid. Just in the proof bodies not thermally treated occur evidences of the resistance loss in the affected bricks for the humidity.

Through the study of the moisture expansion followed by the evaluation of the mechanical flexural resistance, were obtained subsidies to prove that the moisture expansion together with errors of execution of the work and employment of bad quality bricks was one of the main causes that contributed to the collapse of the construction. The results allow to conclude that was a loss of mechanical resistance due to suffered moisture expansion for the bricks.

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES.....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 OBJETIVO.....	3
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 BREVE HISTÓRICO.....	4
2.2 CONCEITO DA EXPANSÃO POR UMIDADE.....	8
2.3 O FENÔMENO DA EXPANSÃO POR UMIDADE.....	8
2.4 EPU EM VIDRADOS.....	9
2.5 FASES CERÂMICAS RESPONSÁVEIS PELA EXPANSÃO POR UMIDADE.....	10
2.6 COMO DIMINUIR A EPU DO PRODUTO CERÂMICO.....	11
2.7 O EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	11
2.8 O EFEITO DA TEMPERATURA DE QUEIMA.....	13
2.9 A IRREVERSIBILIDADE DA EPU.....	14
2.10 A CINÉTICA DA EPU.....	14
2.11 A DETERMINAÇÃO DA EPU.....	15
2.12 O ESTUDO DA EPU NO BRASIL.....	16
<b>3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	19
3.2 MATERIAIS.....	19
3.3 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO EDIFÍCIO ÁQUARELA.....	20
3.4 RESULTADOS DO RELATÓRIO FINAL DO EDIFÍCIO ÁQUARELA.....	23
3.4.1 <i>Ensaios químicos</i> .....	23
3.4.1.1 Análise química do lençol freático.....	23
3.4.1.2 Análise química do solo.....	24
3.4.1.3 Análise química do material constituinte do tijolo.....	25

3.4.2	<i>Ensaio de resistência à compressão</i> .....	25
3.4.3	<i>Ensaio de eflorescência</i> .....	26
3.5	<b>MÉTODOS</b> .....	27
3.5.1	<i>Preparação das amostras</i> .....	28
3.5.1.1	Corpos de prova de 12,0 x 2,0 x 0,5cm e 5,0 x 0,7 x 0,7cm .....	28
3.5.1.2	Amostras dos pós-afetados e não afetados .....	29
3.5.2	<i>Ensaio de expansão por umidade</i> .....	29
3.5.2.1	Imersão em água .....	30
3.5.2.2	Fervura .....	30
3.5.2.3	Panela de pressão .....	30
3.5.2.4	Autoclave.....	31
3.5.2.5	Dilatometria.....	31
3.5.3	<i>Expansão por umidade atual</i> .....	33
3.5.4	<i>Expansão por umidade total</i> .....	34
3.5.5	<i>Expansão por umidade futura</i> .....	34
3.5.6	<i>Ensaio de caracterização mineralógica</i> .....	34
3.5.6.1	Análise química dos tijolos .....	34
3.5.6.2	Análise térmica diferencial .....	35
3.5.6.3	Análise termogravimétrica .....	35
3.5.6.4	Difração de raios-X .....	35
3.5.7	<i>Ensaio de tensão de ruptura a flexão</i> .....	36
3.6	<b>FLUXOGRAMA DA PESQUISA</b> .....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>38</b>
4.1	<b>RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EXPANSÃO POR UMIDADE</b> .....	<b>38</b>
4.1.1	<i>Imersão</i> .....	38
4.1.2	<i>Fervura</i> .....	39
4.1.3	<i>Panela de Pressão</i> .....	40
4.1.4	<i>Autoclave</i> .....	41
4.1.5	<i>Dilatometria</i> .....	42
4.1.6	<i>Expansão por umidade atual</i> .....	43
4.1.7	<i>Expansão por umidade total</i> .....	44
4.1.8	<i>Expansão por umidade futura</i> .....	46
4.2	<b>RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA</b> .....	<b>50</b>
4.2.1	<i>Análise química dos tijolos</i> .....	50
4.2.2	<i>Análise térmica diferencial</i> .....	51
4.2.3	<i>Análise Termogravimétrica</i> .....	52
4.2.4	<i>Difração de raios-x da amostra afetada pela umidade</i> .....	52
4.3	<b>TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO</b> .....	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>58</b>

5.1	INTRODUÇÃO .....	58
5.2	CONCLUSÕES PARCIAIS .....	58
5.2.1	<i>Expansão por umidade</i> .....	58
5.2.1.1	Imersão .....	59
5.2.1.2	Fervura .....	59
5.2.1.3	Panela de pressão .....	60
5.2.1.4	Autoclave .....	60
5.2.1.5	Dilatometria .....	61
5.2.2	<i>Caracterização mineralógica</i> .....	62
5.2.2.1	Análise química do material constituinte do tijolo .....	62
5.2.2.2	Análise térmica diferencial .....	62
5.2.2.3	Análise termogravimétrica .....	62
5.2.2.4	Difração de raios-x .....	62
5.2.3	<i>Tensão de ruptura a flexão</i> .....	63
5.3	CONCLUSÃO FINAL .....	63
<b>6 -</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>64</b>
<b>7 -</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>65</b>
<b>8 -</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>71</b>
8.1	DILATOMETRIAS .....	71
8.2	FOTOS DO EDIFÍCIO AQUARELA .....	80

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - EFEITO DA RAZÃO $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ SOBRE A EPU.....	12
FIGURA 2.2 - EFEITO DA RAZÃO $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ SOBRE A EPU.....	12
FIGURA 2.3 - EFEITO DA TEMPERATURA DE QUEIMA SOBRE A EPU DE UMA ARGILA.....	13
FIGURA 2.4 - VARIAÇÃO DA EPU DE UMA MASSA DE CERÂMICA BRANCA A DIVERSAS TEMPERATURAS COM O TEMPO DE TRATAMENTO NO AUTOCLAVE.....	15
FIGURA 3.1 - SITUAÇÃO, ORIENTAÇÃO E LOCAÇÃO DAS CAVAS EFETUADAS.....	22
FIGURA 3.2 - APARATO PARA MEDIÇÃO DIRETA DA EPU.....	27
FIGURA 3.3 - FLUXOGRAMA DA PESQUISA.....	37
FIGURA 4.1 - EPU MÉDIA TOTAL DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A IMERSÃO.....	38
FIGURA 4.2 - EPU MÉDIA TOTAL DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A PERVURA.....	39
FIGURA 4.3 - EPU MÉDIA TOTAL DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A PANELA DE PRESSÃO.....	40
FIGURA 4.4 - EPU MÉDIA TOTAL DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO AUTOCLAVE.....	41
FIGURA 4.5 - ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL DOS PÓS DOS TILOLOS AFETADOS E NÃO AFETADOS PELA UMIDADE.....	51
FIGURA 4.6 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS PÓS DO TILOLOS AFETADOS E NÃO AFETADOS.....	52
FIGURA 4.7 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DA AMOSTRA AFETADA.....	53
FIGURA 4.8 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DA AMOSTRA NÃO AFETADA.....	54
FIGURA 4.9 - TENSÕES DE RUPTURA A FLEXÃO NOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE EPU POR MEDIÇÃO DIRETA.....	55

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 2.1 .....	10
EQUAÇÃO 3.1 .....	33
EQUAÇÃO 3.2 .....	34
EQUAÇÃO 3.3 .....	34
EQUAÇÃO 3.4 .....	36

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA .....	23
TABELA 3.2 - ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO .....	24
TABELA 3.3 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE BLOCOS CERÂMICOS EM MPa .....	26
TABELA 4.1 - RESULTADOS DAS EPU'S POR DILATOMETRIA (GRUPO 1 EM MM/M) .....	42
TABELA 4.2 - RESULTADOS DAS EPU'S TOTAIS POR DILATOMETRIA SUBMETIDOS A IMERSÃO, FERVURA, PANELA DE PRESSÃO E AUTOCLAVE (GRUPO 2 EM MM/M) .....	43
TABELA 4.3 - DADOS DA EPU ATUAL MÉDIA DE TODOS OS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS A REQUEIMA (MM/M) .....	44
TABELA 4.4 - EPU TOTAL DOS CORPOS DE PROVA DA IMERSÃO (MM/M) .....	44
TABELA 4.5 - EPU TOTAL DOS CORPOS DE PROVA DA FERVURA (MM/M) .....	45
TABELA 4.6 - EPU TOTAL DOS CORPOS DE PROVA DA PANELA DE PRESSÃO (MM/M) .....	45
TABELA 4.7 - EPU TOTAL DOS CORPOS DE PROVA DO AUTOCLAVE (MM/M) .....	46
TABELA 4.8 - EPU FUTURA DOS CORPOS DE PROVA DA IMERSÃO (MM/M) .....	47
TABELA 4.9 - EPU FUTURA DOS CORPOS DE PROVA DA FERVURA (MM/M) .....	47
TABELA 4.10 - EPU FUTURA DOS CORPOS DE PROVA DA PANELA DE PRESSÃO (MM/M) .....	48
TABELA 4.11 - EPU FUTURA DOS CORPOS DE PROVA DO AUTOCLAVE (MM/M) .....	48
TABELA 4.12 - COMPARAÇÃO DAS EPU'S ENTRE MEDIÇÃO DIRETA E DILATOMETRIA .....	49
TABELA 4.13 - ANÁLISE QUÍMICA DOS TIJOLOS AFETADOS E NÃO AFETADOS .....	51
TABELA 4.14 - RESULTADO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA PELA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DA AMOSTRA AFETADA .....	53
TABELA 4.15 - RESULTADO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA PELA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DA AMOSTRA NÃO AFETADA .....	54
TABELA 4.16 - VALORES DA TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO MÉDIA EM MPa EM DIVERSAS CONDIÇÕES DE ENSAIO .....	56

## 1 - INTRODUÇÃO

Os tijolos são fabricados há aproximadamente 5.000 anos A. C., segundo arqueólogos que já encontraram peças de barro com até 15.000 anos A. C. Os tijolos eram endurecidos quando colocados sob exposição ao sol. Os primeiros fornos que foram catalogados são de 3.000 anos A. C. (Macedo, 1997).

As argilas que são o material constituinte dos tijolos têm grande porosidade, absorvem água e com isto, expandem-se. No entanto, apenas na década de 20 é que a expansão de peças cerâmicas queimadas tem sido estudada por vários pesquisadores, inicialmente pelos destacamentos e fissuras que apareciam nas peças de revestimento, contudo, apenas nos anos 50 é que este fenômeno foi indicado como a causa de danos estruturais em alvenarias.

O termo técnico utilizado para designar este fenômeno é a expansão por umidade (EPU), que é a recombinação de água na forma líquida ou de vapor com os materiais cerâmicos, a expansão ocorre de forma indefinida, numa razão não constante e que diminui com o tempo.

As causas que levam ao desenvolvimento deste fenômeno ainda não são perfeitamente conhecidas, mas é sabido que corpos cerâmicos adsorvem umidade logo após a queima, a partir do momento que é iniciado o seu resfriamento ainda dentro do forno. No caso de construções já concluídas a água pode ser adsorvida da umidade do ambiente, ou do solo por capilaridade a partir da fundação da construção.

Os materiais cerâmicos como azulejos e tijolos, que durante a sua aplicação são colados lado a lado entre si com argamassa, podem sofrer expansões. A expansão desse material além de um determinado limite compromete a aderência dos revestimentos, e nos tijolos da alvenaria, afetados pela umidade, geram tensões que resultam no aparecimento

---

de trincas que afetam a resistência mecânica pelo abaixamento do seu módulo de elasticidade, comprometendo a estabilidade das estruturas de alvenaria.

Os sais solúveis também podem reduzir a resistência mecânica através de um processo de desintegração. As principais fontes destes sais são os materiais de construção e o solo onde são erguidas as estruturas.

## ***1.1 JUSTIFICATIVA***

Como a EPU é pouco estudada aqui no Brasil, principalmente em cerâmica vermelha, há a necessidade de um estudo sistemático deste fenômeno em alvenarias cerâmicas com o intuito de melhor conhecer os fatores envolvidos, bem como fornecer subsídios de forma a prever comportamento estrutural futuro das edificações.

Em 1997 na região do município de Jaboatão dos Guararapes, Recife, PE, ocorreu o colapso das alvenarias do Edifício Aquarela, edifício de quatro pavimentos construído em alvenaria estrutural. Neste edifício ocorreu a ação da água do lençol freático na estrutura de fundação e na estrutura do pavimento térreo. Segundo conclusão de um relatório técnico feito na época, a causa do desabamento foi atribuída ao fenômeno de EPU que resultou na perda de resistência mecânica da alvenaria.

Em novembro de 1999 o Edifício Ericka, construído em 1987, localizado na rua Humberto de Lira Santos, 600, Jardim Fragoso, Olinda, PE, desabou provocando quatro vítimas fatais e sete feridos. Dois meses depois, o Edifício Enseada do Serrambi, situado a cerca de 2km do Edifício Ericka, na rua Barão de São Borja, 30, Bultrins, Olinda, PE, construído há cerca de 9 anos também veio a desabar, virando um amontoado de entulhos em menos de 1 minuto (Amorim, 2000).

Hoje há uma preocupação bastante intensa do Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura, dos diversos órgãos governamentais e da defesa civil com a estabilidade futura de outras edificações. Somente na cidade do Recife existem cerca de 4.000 edifícios construídos em alvenaria estrutural, muitos dos quais em áreas alagadas, desse modo, é fácil perceber a importância deste estudo.

## **1.2 OBJETIVO**

Esta pesquisa tem como objetivo estudar o fenômeno da EPU nos tijolos cerâmicos furados do Edifício Aquarela que estavam apoiados no vigamento da fundação que não sofreu danos estruturais, bem como a resistência mecânica à flexão. O estudo será feito em escala de laboratório para um melhor entendimento do fenômeno e com os resultados obtidos, verificar se a EPU é maior nos tijolos afetados pela umidade do que nos não afetados, o que causaria conseqüentemente, uma perda da resistência mecânica dos tijolos afetados.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BREVE HISTÓRICO

A expansão por umidade de produtos cerâmicos foi apontada pela primeira vez em 1926 (Merrit e Peters) como a causa do gretamento em vidrados de cerâmicas brancas.

Schurecht (1928) abordou a EPU através de ensaio acelerado pelo uso da autoclave, demonstrando que em muitos casos o fendilhamento ocorrido ao longo do tempo era causado por expansões do corpo devido a fenômenos de re-hidratação de silicatos anidros por ação da umidade. Ele chegou à conclusão de que corpos que apresentam menor tendência ao fissuramento são os que têm baixa porosidade.

Schurecht e Pole (1929) analisaram a ordem de expansão por umidade em diversos tipos de corpos cerâmicos, medindo o aumento ao longo do comprimento quando eram submetidos a vapor d'água sob diferentes pressões. Eles verificaram que os corpos compostos de argila e feldspato tinham consideravelmente menor expansão do que os corpos compostos de argila, feldspato e quartzito e concluíram que a expansão devido à umidade dependia dos constituintes do material, e que as fissuras causadas por esse efeito poderiam ser evitadas pelo controle na produção. Mills (1930) pesquisou o efeito de diversos fatores no ensaio de autoclavagem, tais como porosidade, duração do ensaio, velocidade de pressurização e número de repetições.

Holscher (1931) preparou vários corpos de prova com composições diferentes e os submeteu a tratamentos à vapor com pressão de 1,035MPa, em 6 tempos sucessivos, confirmando os resultados de Schurret e Pole(1930) de que a composição de um corpo cerâmico seria mais importante do que a absorção de água. Em outro trabalho Schurret e Pole (1931) submeteram vários corpos de prova a diferentes tratamentos para a absorção da umidade, concluíram que a autoclavagem causa um aumento de volume acompanhado de um aumento de peso, a taxa de aumento é rápida no início, mas diminui com o tempo,

também afirmaram que a expansão no autoclave é devido a absorção de água no interior do corpo de prova e não devido a alta temperatura ou pressão do autoclave. No final secou os corpos a 110° C e percebeu que não retornaram ao peso de antes do ensaio.

Palmer (1931) provou que os materiais constituintes de alvenaria de tijolos sofrem diferentes expansões de acordo com a mudança no clima da região. No ciclo de molhagem (expansão) e secagem (contração) da alvenaria, a recuperação das dimensões iniciais desde a data da construção não é total.

Treischel (1935) realizando ensaios em laboratório mostrou que equipamentos simples, mas de boa resolução, têm suficiente precisão e são eficientes para medidas de EPU em laboratório.

Mellor (1937) publicou um trabalho muito extenso sobre o fendilhamento dos azulejos após fixação, hoje considerado clássico, este estudo faz inicialmente críticas ao ensaio por autoclavagem, devido ao fato de superpor dois fatores: alta temperatura que provoca uma excessiva quantidade de vapor e alta pressão que provoca uma absorção maior de vapor, resultando numa expansão que provavelmente nunca ocorreria em condições normais de temperatura e pressão. Além do fato de que, na época, havia dúvidas quanto ao fenômeno de dilatação dos corpos cerâmicos pela ação da umidade.

Thiemeche (1941) estudou que adição de feldspato aumenta a EPU em caulins e vidrados, quando estas amostras são desidratadas a diferentes temperaturas. Os resultados obtidos são insuficientes para confirmar qualquer teoria de que a natureza da EPU está relacionada com a porosidade dos corpos cerâmicos.

Zsolnay (1946), afirmou que azulejos que suportassem o ensaio de autoclavagem por duas horas a 0,7MPa teriam vida útil de vinte anos; que o efeito da contração posterior do vidrado era desprezível e que após aplicação do azulejo, a influência das características da argamassa e sua espessura seriam também desprezíveis.

Em 1954 McBurney atribuiu as falhas estruturais de três construções à EPU. Neste mesmo ano, Bullin and Green discutiram amplamente a importância da dilatação dos corpos cerâmicos pela ação da umidade, citando que esta dilatação só é importante para azulejos armazenados em condições de elevada umidade. Realizaram ensaios com azulejos

---

no autoclave a uma pressão de 0,275MPa por um período superior a 2000h e encontraram expansões acima de 0,35%.

Até 1955 as causas da EPU não eram bem conhecidas, quando, então, o trabalho de Smith (1955) citou pela primeira vez que a EPU é causada pela diminuição da tensão superficial dos corpos, quando a umidade era adsorvida à sua superfície. Esta tensão é apontada como a força motora do processo de expansão por umidade. No mesmo artigo Smith ainda apresentou evidências experimentais que confirmavam a sua teoria.

Young e Brownell (1959) ensaiaram 27 amostras de tijolos cerâmicos comerciais, os quais apresentaram valores de EPU variando na faixa entre 0,08mm/m (0,008%) e 1,96mm/m (0,196%). Esta faixa de EPU apresentou valores superiores aos obtidos a partir do estudo de McBurney (1954) (0,5mm/m), o que levou o autor a propor um limite aceitável de expansão, de 2mm/m (0,2%). e complementaram o trabalho de Smith (1955), confirmando que as fases cristalinas não apresentam EPU, ao contrário da fase vítrea.

Segundo Ferreira e Machado (1974), os ensaios de choque térmico e autoclavagem não devem ser usados para caracterizar sistematicamente a provável vida útil de um azulejo, como é comum nas indústrias cerâmicas, pois, quando em serviço seu comportamento não condiz, ou mesmo se contradiz com os resultados obtidos para choque térmico e autoclavagem.

Baumgartner e Ferreira (1980), afirmam que os ensaios de choque térmico e autoclavagem são insuficientes para caracterizar a probabilidade de ocorrer o fendilhamento no vidrado de azulejos em serviço.

Azulejos assentados com argamassa de cimento-areia podem apresentar fendilhamento, cuja causa, os pesquisadores atribuem à tensões originadas no azulejo devido à ação da umidade nos corpos cerâmicos (Machado e Ferreira, 1983).

Atualmente é admitido que a expansão por umidade é principalmente devida à adsorção física e química da umidade no interior do corpo cerâmico. Desse modo um tratamento de reaquecimento para remover essa água deve ser usado, para a recuperação das dimensões originais. O fator complicador é que o processo de adsorção começa tão logo os produtos resfriam ainda no interior do forno, entretanto, existem outros fatores.

---

Durante a exposição ao ambiente surgem microfissuras no interior de muitas peças devido ao alívio de tensões térmicas, isso pode resultar em uma expansão irreversível. Cargas externas, sais e água congelada podem também induzir a expansão (Bowman, 1996).

Recentemente, em 1996, Bowman, publicou trabalho enfatizando possíveis deficiências sobre os métodos empregados na determinação da expansão por umidade e sugerindo um melhoramento na precisão das determinações da EPU pelo uso do dilatômetro, com temperatura de requieima de 450°C, contudo, deixa claro que há a necessidade de pesquisas complementares em diversas áreas, incluindo estudos detalhados sobre as transformações de fases, principalmente as transformações do quartzo ( $\alpha \rightarrow \beta$ ), que ocorrem durante o reaquecimento em grande parte dos materiais cerâmicos.

Ainda segundo Bowman (1996) as características de expansão dependem do tipo da peça cerâmica, este trabalho também aponta a necessidade de novos estudos experimentais no desenvolvimento de métodos de ensaios aprimorados que permitam avaliar a expansão passada e a futura provável de peças cerâmicas. Os motivos do estudo da expansão por umidade devem ser considerados, para proporcionar uma melhor escolha do método de ensaio (Planejamento Experimental), por exemplo, na determinação da expansão futura de um produto específico.

Quando revestimentos cerâmicos ou alvenarias de tijolos apresentam problemas devido ao movimento diferencial dos seus componentes, é importante que se determine a expansão por umidade dos componentes cerâmicas envolvidos (Bowman, 1996).

No DEMa/UFSCar, Baldo e colaboradores, (1997) estudaram a evolução das tensões em revestimento cerâmicas e o modelamento de expressões que relacionam a absorção de água com a evolução das tensões respectivamente.

Em reportagem publicada no Diário de Pernambuco (1997) sobre o afundamento do Edifício Aquarela, em Piedade, Jaboatão dos Guararapes-PE mostrou que a causa foi a ruptura das alvenarias de sustentação do imóvel que não foi executada como projetada. Este foi o resultado do laudo técnico do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Pernambuco (CREA-PE). Um dos estudos que foi parte do relatório final, efetuados no DEMa, CCT, UFPB, comprova que os tijolos do embasamento perderam a

resistência a compressão, em aproximadamente 20%, em virtude da ação da umidade ao longo do tempo.

## **2.2 CONCEITO DA EXPANSÃO POR UMIDADE**

Os materiais cerâmicos contêm silicatos anidros. Quando a água na forma líquida, ou vapor existente no meio, recombina-se com os silicatos anidros, tem como efeito o aumento das dimensões da peça cerâmica, de forma indefinida numa razão não constante e que diminui com o tempo. Todos os produtos cerâmicos porosos apresentam este fenômeno, cuja intensidade é dependente dos constituintes e da área específica da peça cerâmica. Os diferentes tipos de produtos apresentam diferentes superfícies internas, que variam conforme o método de fabricação e as condições de queima, acarretando em diferentes expansões. A expansão produzida pelas diferentes ações da umidade sobre o corpo, começa quando estes estão resfriando dentro do forno, na medida em que eles absorvem umidade através de suas áreas específicas, este processo não cessa quando o produto cerâmico é removido do forno, pois esta expansão continua durante o armazenamento e após serem fixados, embora em uma proporção gradualmente reduzida durante longos períodos de tempo.

## **2.3 O FENÔMENO DA EXPANSÃO POR UMIDADE**

Numa partícula sólida, todos os átomos em seu interior estão cercados por outros quimicamente ligados, estas ligações baixam a energia dos átomos e faz com que mantenham uma certa distância entre eles. Como os átomos da superfície do sólido não têm todos os seus vizinhos, estão num estado energético mais elevado e comprimem os átomos internos de forma a diminuir o diâmetro da partícula. Para obedecer ao princípio da natureza que sempre procura um estado de mais baixa energia, os átomos da superfície procuram fazer novas interações, quer sejam químicas ou físicas. A energia resultante dessas interações químicas ou físicas com o meio é conhecida como energia superficial. Se a tensão superficial fosse reduzida, por um mecanismo qualquer, a partícula se expandiria, por exemplo, mudando o meio em que a partícula se encontra muda-se o valor da energia superficial.

Uma peça cerâmica é constituída de um grande número de pequenas partículas que se expandem devido ao abaixamento da tensão superficial causado pela adsorção de umidade sobre as suas superfícies.

Segundo Demeduk e Cole (1960) a EPU é o resultado da água condensada por capilaridade, da água fisicamente adsorvida, da água quimicamente adsorvida, da água quimicamente ligada, ou da combinação de todos estes fatores. Assim quando moléculas de água são adsorvidas na superfície do sólido, pelas fases constituintes da peça cerâmica, ocorre um aumento de dimensões desta peça, ou seja, a EPU. Em outras palavras, se uma molécula de água é atraída mais fortemente por uma superfície porosa do que por outras moléculas do líquido, esta será adsorvida pela superfície. A magnitude da expansão dependerá da magnitude da redução da energia superficial, bem como o módulo de elasticidade do sólido.

A água condensada por capilaridade ocorre em grandes poros, e pode ser eliminada por aquecimento do corpo a 110°C, eliminando parcialmente a expansão por umidade sofrida, já a água fisicamente adsorvida na superfície dos poros requer temperaturas maiores para ser removida.

## **2.4 EPU EM VIDRADOS**

A adsorção da umidade nos vários vidrados foi bem estudada por muitos pesquisadores. Nos anos 40, Barret, Birnie, e Cohen, descobriram que a sílica vítrea, em temperatura ambiente, continua a adsorver água por um longo período de tempo, sugerindo algum processo de difusão.

Vaughan e Dinsdale (1960) mostraram experimentalmente que entre as temperaturas de 600°C e 1200°C ocorre adsorção de água no vidro, em períodos de tempo relativamente curtos. Por um instante, usando infravermelho, encontraram após 36h a 1160°C, grupos de hidroxilas (OH) que foram difundidos dentro da sílica e detectados a uma profundidade de 200 microns.

Hallers (1960) conduziu alguns experimentos e concluiu que a adsorção da água por certos silicatos vidrados seguiam inicialmente uma curva parabólica, a magnitude da

---

taxa de absorção é da ordem de  $10^{-8} \text{g.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1/2}$  acompanhada de uma expansão volumétrica. Assim podemos escrever que a expansão  $W$  é:

Equação 2.1

$$W = K\sqrt{T}$$

Onde:

$$K = 10^{-8} \text{g.cm}^{-2} \text{dia}^{-1/2}$$

T = Tempo em dias

Se tomarmos um exemplo de material cerâmico com uma área superficial de  $0,5\text{m}^2$ , por um tempo T de 365 dias, pela equação 2.1 teremos uma EPU de 0,1%. O que representa a EPU em percentagem após um ano.

## ***2.5 FASES CERÂMICAS RESPONSÁVEIS PELA EXPANSÃO POR UMIDADE.***

Segundo Smith (1955) os corpos cerâmicos são constituídos, após a queima por três fases: amorfas, vítreas e cristalinas.

As fases amorfas têm as suas estruturas todas desordenadas, com isso, apresentam as maiores áreas específicas expostas à interação com a água e grande energia superficial. A saturação das valências insatisfeitas nas superfícies expostas proporciona uma adsorção de água, que é atraída por valências do tipo  $\text{Si}^4$  e  $\text{SiO}$  existentes nas regiões de descontinuidade, ou seja, nas áreas superficiais do sólido, as quais acabam se ligando, formando grupos  $\text{SiOH}$  e  $\text{SiOH}_3\text{O}$ , após a saturação das valências livres uma maior quantidade de água poderá ser absorvida.

As fases amorfas são geralmente identificadas como responsáveis pela rápida expansão inicial, resultantes da decomposição dos minerais argilosos durante a queima.

As fases vítreas são um produto da fusão parcial das argilas que contêm álcalis (principalmente sódio e potássio) em seu estado inicial, que ao serem resfriados até uma condição rígida não conseguem cristalizar. Possuem área específica e energia superficial bem menores que os amorfos, mas submetidos ao processo de lixiviação (troca de íons alcalinos e íons de hidrogênio da água) produz uma película superficial com estrutura semelhante a da sílica amorfa (sílica gel) que favorecem a adsorção. Esta lixiviação ainda proporciona a abertura de poros (inicialmente fechados) aumentando a área específica e, portanto a EPU. Daí a tendência de algumas fases vítreas apresentarem EPU, mas não tão elevadas quanto a das fases amorfas.

As fases cristalinas comparadas com as fases amorfas têm baixa superfície específica, sua capacidade de adsorção de água é relativamente pequena, possuem consideráveis números de valências livres ávidas por interagir com outros elementos, e dessa forma, baixarem seu estado energético, conseqüentemente não apresentam EPU.

## ***2.6 COMO DIMINUIR A EPU DO PRODUTO CERÂMICO***

A presença das fases cerâmicas com elevadas tensões superficiais e áreas específicas devem ser evitadas, pois estas fases apresentam um considerável abaixamento da tensão superficial quando a umidade é adsorvida em sua superfície apresentando baixo módulo de elasticidade.

## ***2.7 O EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA***

Young e Brownell (1959), queimaram oito argilas diferentes de modo, que todas as amostras apresentassem absorção de água igual a 8%, para evitar os efeitos da adição de umidade sobre a EPU, e submeteram ao ensaio em autoclave 2,04 MPa por 3h os resultados obtidos foram expressos pela variação da EPU com as razões  $Al_2O_3 / SiO_2$  e  $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$ . As figuras 2.1 e 2.2 exibem estes quocientes.

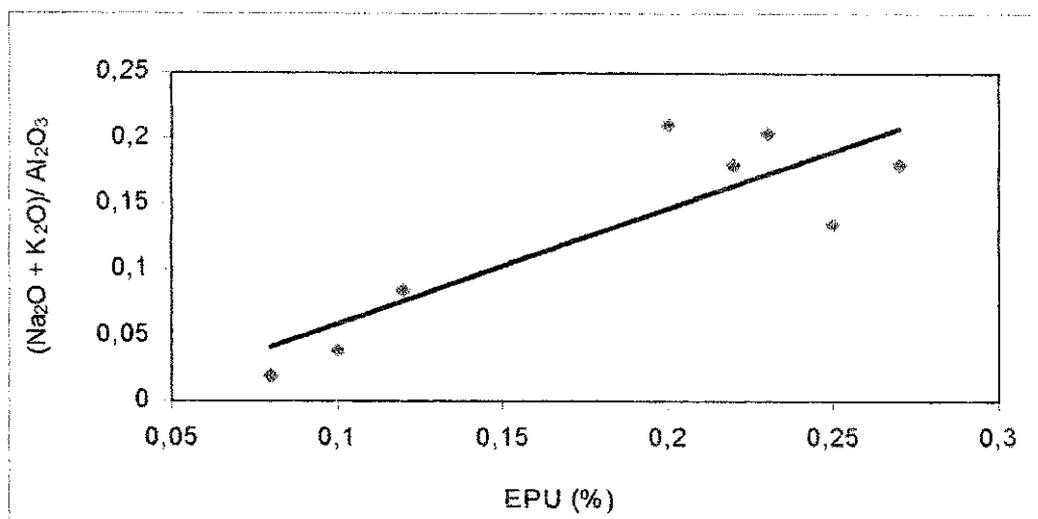


Figura 2.1 - Efeito da razão  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$  sobre a EPU.

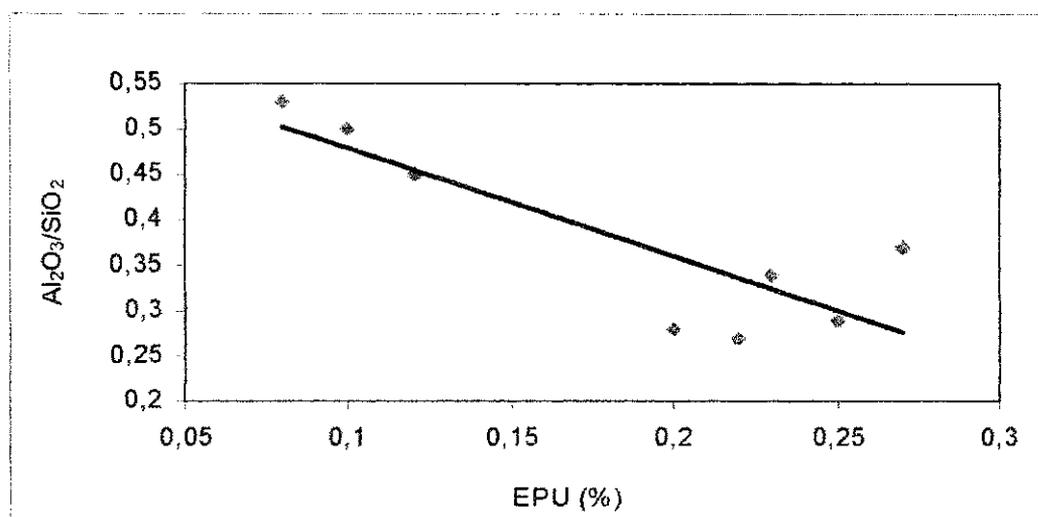


Figura 2.2 - Efeito da razão  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$  sobre a EPU

Percebe-se que a EPU tende a aumentar com o aumento da razão  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ , e diminuir com o aumento da razão  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ , isto ocorre devido a quantidade e composição química da fase vítrea, formada durante o resfriamento da fase líquida que surge durante as temperaturas mais elevadas do ciclo de queima. Assim a magnitude da expansão depende claramente da composição química do produto cerâmico queimado.

## 2.8 O EFEITO DA TEMPERATURA DE QUEIMA

Young e Brownell (1959) queimaram oito tipos de argilas a várias temperaturas e obtiveram após um tratamento, em autoclave de 2,04 MPa por 3h, as expansões de cada argila. O comportamento de sete das oito argilas foi semelhante ao da fig. 2.3, que apresenta uma EPU mínima a 850°C, pra em seguida, aumentar gradualmente até atingir um máximo entre 900°C e 950°C quando então torna a diminuir com a elevação da temperatura.

Enrique e colaboradores (1990) sugerem que para materiais argilosos, com o aumento da temperatura de queima, a EPU atinge um valor máximo entre 950°C e 1050°C, e diminui com o aumento da temperatura a partir desse ponto. Sugere também que a variação da EPU com a temperatura é afetada pela composição da massa, pelas condições de conformação e pelo ciclo de queima. Os ciclos mais rápidos favorecem a presença de fases amorfas e conseqüentemente a EPU. Portanto, antes de reduzir o ciclo de queima, é necessário que se busquem composições que resultem em menores proporções de fases amorfas e vítreas e que sejam menos reativas.

Lira e colaboradores (1997) estudaram o fenômeno da EPU, onde a composição e a temperatura de queima foram avaliadas, e concluíram que a maior temperatura de sinterização correspondeu a corpos de prova com menor expansão por umidade, provavelmente devido a uma maior proporção de fases cristalinas na sua constituição.

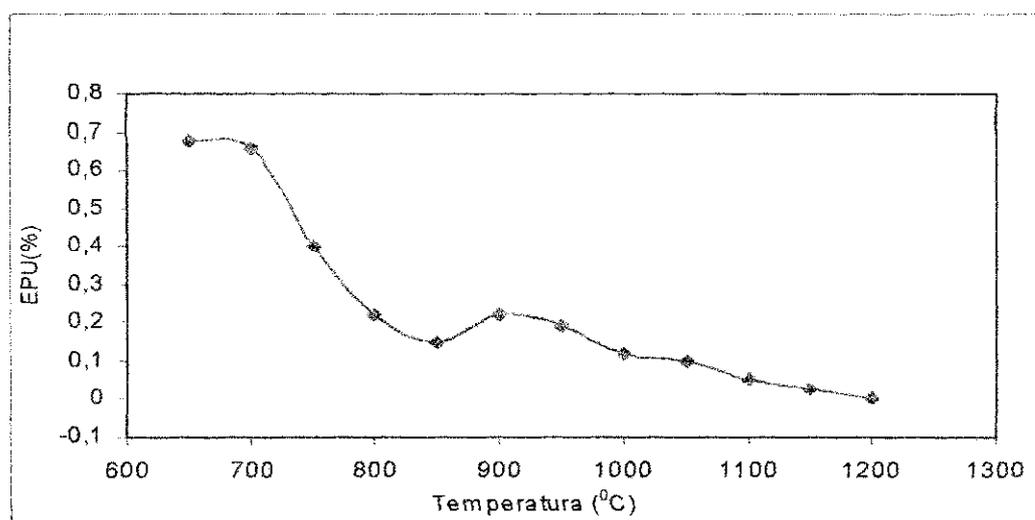


Figura 2.3 - Efeito da temperatura de queima sobre a EPU de uma argila.

## 2.9 A IRREVERSIBILIDADE DA EPU

Lomax e Ford (1983) sugeriram que a expansão por umidade ocorrida em tijolos poderia ser determinada através de um reaquecimento, eliminando desta forma, qualquer expansão por umidade desconhecida, ocorrida entre o descarregamento do forno e a estocagem do material. A partir deste estudo foram levantadas diversas questões, argumentando se a expansão por umidade era completamente reversível e qual temperatura deveria ser usada para remover esta expansão. (Robinson, 1984)

Um estudo sobre a reversibilidade da expansão por umidade, através de dilatometria concluiu que, em alguns casos, a EPU pode ser removida por aquecimento em temperaturas na faixa entre 400°C e 500°C, sendo a temperatura de reaquecimento um parâmetro de grande importância, pois temperaturas elevadas poderão conduzir a uma sinterização adicional (*Ibid.*).

A sinterização adicional (que modifica a estrutura química e física original do corpo de prova) faz com que determinações de EPU, neste mesmo corpo de prova, apresentem valores maiores do que ocorreriam normalmente, se não houvesse ocorrido a nova sinterização.

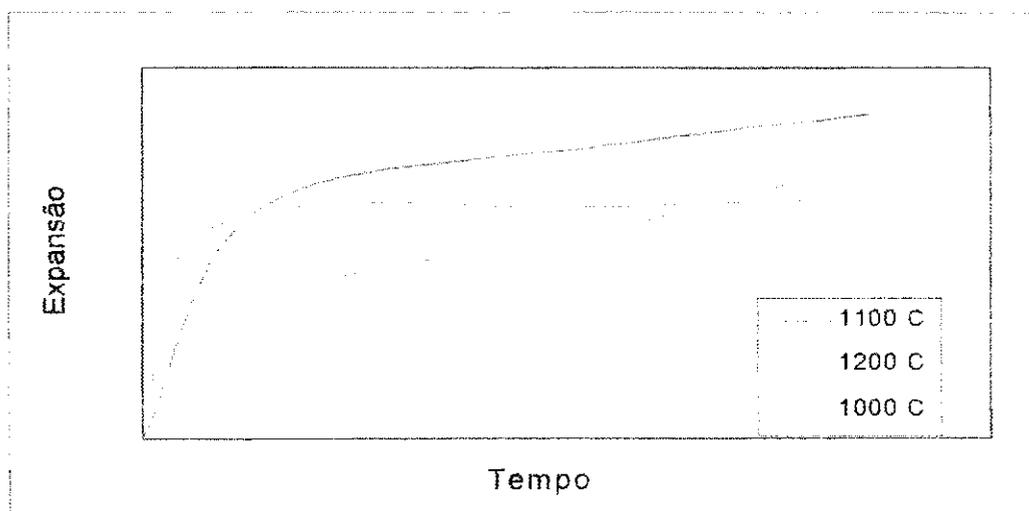
A reversibilidade da expansão por umidade só seria possível se as águas adsorvida e livre pudessem ser retiradas pelo aquecimento a determinadas temperaturas (acima de 573°C), mas acarretaria em um inconveniente, que é a mudança de fase do quartzo  $\alpha$  para o quartzo  $\beta$ , o que alteraria a composição química do material. Assim a reversão da EPU não ocorre nas condições normalmente encontradas nos ambientes em que estes materiais estão aplicados.

## 2.10 A CINÉTICA DA EPU

A Figura 2.4 exibe as curvas típicas da EPU. Elas são caracterizadas inicialmente por um aumento rápido da EPU, a seguir passam por uma zona de transição e finalmente chegam a uma região em que a inclinação da curva é bem menor que a das regiões anteriores. Na região final a expansão não tende a alcançar um valor máximo, mas sim continua aumentando de um modo lento e constante. As fases amorfas, por apresentarem

---

maiores superfícies expostas à interação com a água, são geralmente identificadas como responsáveis pela rápida expansão inicial. A fase vítrea na zona de transição é a única esta sofrendo transformações importantes e, portanto, é razoável sugerir que esta fase seja responsável por esse comportamento. A explicação é que na fase vítrea de um produto cerâmico, quando exposto à ação da umidade, ocorre uma troca entre os íons alcalinos do vidro e os íons hidrogênio da água, formando na superfície do vidro, uma película com uma estrutura semelhante à da sílica amorfa. Este processo de troca de íons também favorece a abertura de poros, aumentando assim a área disponível para a adsorção de água. A troca de íons necessária para que a fase vítrea venha a contribuir com a EPU é geralmente um processo lento, pois dependem da difusão dos íons e, portanto, é apontado como o principal mecanismo atuante na etapa final (Verduch, 1965).



Adaptado de L. F. A. Campos.

Figura 2.4 - Variação da EPU de uma massa de cerâmica branca a diversas temperaturas com o tempo de tratamento no autoclave.

## 2.11 A DETERMINAÇÃO DA EPU

A determinação da EPU é feita através da medição da deformação do corpo de prova após ser submetido ao autoclave (ASTM C424, 1993 e ASTM C370, 1994) ou água fervente (ISO 10545-10, 1995 e BS 6431: Parte 21, 1991). Estas normas sugerem que a EPU máxima para o piso seja de 0,6 mm/m (0,06%) e a EPU máxima para os tijolos sejam de 0,3 mm/m (0,03%).

Embora o ensaio da autoclave seja largamente mencionado na literatura e de uso comum na prática industrial, ele é bastante criticado. Uma das críticas é que as amostras submetidas a condições extremas da autoclave podem vir a apresentar EPUs bastante maiores que as observadas em condições normais de uso. Essa diferença observada provavelmente é devida ao fato de que nas condições da autoclave ocorrem várias reações que em condições normais de utilização não teriam as energias de ativação necessárias e, portanto, mesmo para períodos de tempo extremamente longos jamais ocorreriam.

Também no ensaio de água fervente a elevação da temperatura e da concentração dos reagentes, acima das condições normais de uso, fornecem maior energia de ativação e aceleram a velocidade das reações que nas condições normais de uso não ocorreriam.

A medida da EPU pode ser realizada diretamente através da medição do corpo de prova, com um extensômetro, antes e após o ensaio de EPU, sendo o dilatômetro o método mais moderno e preciso que existe atualmente.

## ***2.12 O ESTUDO DA EPU NO BRASIL***

O estudo da EPU no Brasil ainda é incipiente, foi iniciado há algumas décadas nos departamentos de engenharia de materiais das universidades de São Carlos (UFSCar), de Santa Catarina (UFSC) e da Paraíba (UFPB). Os trabalhos nas universidades do Sul do país foram desenvolvidos com o objetivo de verificar a influência da adição de carbonatos de cálcio e magnésio sobre a EPU de corpos cerâmicos.

Na UFPB os estudos iniciaram em 1975, tendo como objetivo a expansão sofrida por azulejos cerâmicos (Baumgartner e Ferreira, 1975). Em 1999, foi formada uma equipe de estudos sobre EPU composta por professores, alunos de doutorado, mestrado e iniciação científica, sendo coordenada pelo Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira, do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa). As pesquisas desenvolvidas e em andamento focalizam os seguintes aspectos: estudo da EPU em matérias primas para cerâmica vermelha (Campos e colaboradores, 1999); otimização da técnica de dilatométrica na determinação da EPU (Amorim e colaboradores, 2000), e o estudo da EPU em massas convencionais e alternativas pelo uso do resíduo de granito, para revestimentos cerâmicos (Gomes e colaboradores, 2000).

Também como parte das pesquisas do DEMa/UFPB, foram elaborados laudos técnicos sobre as causas do desabamento dos Edifícios Aquarela, Ericka e Enseada de Serrambi, construídos em alvenaria estrutural singela, na Grande Recife, PE. O Edifício Aquarela (estudado nesta dissertação) construído em 1982, sofreu colapso estrutural em 1997. Em novembro de 1999, o Edifício Ericka, construído em 1987, localizado à rua Humberto de Lira Santos, 600, Jardim Fragoso, Olinda, PE, desabou deixando quatro vítimas fatais e sete feridos. Dois meses depois, o Edifício Enseada do Serrambi, situado a cerca de 2km do Edifício Ericka, à rua Barão de São Borja, 30, Bultrins, Olinda, PE, construído há cerca de 9 anos também veio a desabar, virando um amontoado de entulhos em menos de 1 minuto.

Chiari e colaboradores (1996) ressaltam o fato de que 40 anos depois da publicação de vários artigos a grande maioria dos ceramistas brasileiros desconhece os mecanismos que levam a EPU, muito embora, considerável parte deles conviva diariamente com esse problema.

Uma das conclusões de Chiari e Colaboradores (1996), é que a avaliação da EPU deve seguir rigorosamente os procedimentos descritos no projeto de Norma ISO-DIS 10545-10 tanto no que se refere ao condicionamento das amostras através de um tratamento térmico no qual estas são aquecidas até  $(550 \pm 15)^\circ\text{C}$ , a uma taxa de  $150^\circ\text{C}$  por hora, e permaneçam nesta temperatura por 2 horas. A seguir as amostras devem ser resfriadas no interior do forno até atingirem temperaturas de  $(70 \pm 10)^\circ\text{C}$  e imediatamente transferida para um dissecador onde devem permanecer por um período entre 24 e 72 horas. Quanto a medida da EPU propriamente dita, o projeto de Norma ISO-DIS 10545-10, utiliza a água fervente por um período de 24 horas.

Muito embora o ensaio de autoclave seja largamente mencionado na literatura e de uso muito comum na prática industrial, ele acabou sendo excluído do projeto da norma devido às controvérsias que ainda existem. Para os pesquisadores, devido à necessidade de se acelerar o processo de EPU para liberar ou não os produtos para consumo, o ensaio em água fervente parece até o momento ser a melhor opção e, ao ser transformado em norma deverá ser utilizado industrialmente.

É importante mencionar que ainda existe a necessidade de pesquisas fundamentais em diversas áreas, incluindo estudos detalhados das relações entre a composição mineralógica, velocidade da expansão por umidade e transformações de fase que ocorrem com tratamento térmico para uma grande diversidade de cerâmicas.

Sabe-se que praticamente todos os revestimentos cerâmicos e também juntas, rejuntas, argamassa colante e tijolos apresentam uma certa expansão por umidade, desse modo, estão sendo estabelecidos limites de expansão para alguns destes materiais que poderão constar em normas técnicas.

### **3 - MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo serão apresentados os materiais que foram extraídos do Edifício Aquarela em Jaboatão dos Guararapes, alguns ensaios realizados por outros órgãos que complementam a análise, os métodos utilizados nos ensaios e um fluxograma da pesquisa.

#### **3.2 MATERIAIS**

- Água do local
- Solo do local
- Alvenaria de embasamento - tijolos do edifício que sofreram ação da umidade por estarem em parcial ou total contato com o solo e lençol freático, ou seja, os tijolos das fundações.
- Alvenaria da superestrutura ou elevação - tijolos que não foram afetados pela umidade ou minimamente afetados.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram selecionados 700 corpos de prova de um lote de 200 tijolos furados, sendo 100 afetados pela umidade que pertenciam a alvenaria da base e 100 não afetados pela umidade que pertenciam a alvenaria de elevação; os tijolos afetados foram retirados do embasamento da estrutura que estavam expostos e todos úmidos, boa parte dos tijolos estava inteira, enquanto os tijolos não afetados foram retirados da parte superior de paredes soltas, estes estavam todos secos. Todos os tijolos foram trazidos para Campina Grande e acondicionados em local coberto.

Todo o material foi recolhido no Edifício Aquarela, situado à Rua Sucupira do Norte, N° 05, esquina com a Rua José Brás Moscou, Piedade, Jaboatão dos Guararapes – PE.

---

É de conhecimento geral que a cidade do Recife tem pontos na sua geografia, abaixo do nível do mar. No local do edifício em questão o nível da água era superficial, e de acordo com moradores da região permanece assim quase todo o ano.

### **3.3 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO EDIFÍCIO AQUARELA**

Os dados sobre as características da edificação que foram utilizados nesta pesquisa foram compilados do Relatório Final do Edifício Aquarela, fornecido pelo Engenheiro Romilde Almeida de Oliveira.

A obra aqui considerada foi executada há cerca de quinze anos. O edifício é constituído de dois blocos de quatro pavimentos, construído em alvenaria estrutural singela, de tijolos cerâmicos vazados de seis furos. Em nossa região, este tipo de construção é denominado “edifício caixa”.

A resistência característica do concreto à compressão especificada no projeto estrutural foi de 15MPa. Não há referência acerca da resistência à compressão dos tijolos cerâmicos.

A seguir são descritas as principais características dos elementos estruturais:

- **Lajes**

As lajes de piso e de cobertura são pré-moldadas do tipo convencional, formadas a partir de blocos de argamassa de cimento e areia apoiados sobre nervuras (vigotas em concreto armado), com posterior capeamento em concreto estrutural executado “in loco”.

- **Paredes em alvenaria**

As alvenarias são de tijolos cerâmicos vazados, singelas com assentamento a galga e com pé-direito igual a 2,60m. São alvenarias portantes, ou seja, cada nível resiste à todas as cargas atuantes que estão situadas acima.

---

### • Vigas e cintas

Em todos os pavimentos foram previstas vigas e cintas dentro do seguinte princípio:

- ao longo das paredes externas, cintas armadas com seção transversal 10cm x 30cm;

- ao longo das paredes internas, cintas armadas com seção transversal 10cm x 20cm;

- em regiões dotadas de aberturas maiores nas paredes, vigas em concreto armado com seções e armaduras conforme o caso;

- todas as vigas se apóiam diretamente sobre as alvenarias, com exclusão da região onde está situado o reservatório superior. Nesta região estão dispostos quatro pilares com o objetivo de receber a sua carga.

### • Fundações

O projeto estrutural prevê para as fundações um embasamento de alvenaria dobrada (20cm de espessura), sob todas as paredes, apoiado sobre sapatas corridas em concreto na forma de T invertido. A alma tem espessura de 20cm e altura de 45cm. A mesa tem largura de 50cm e altura de 15cm. Na parte superior foi projetado um radier com seção transversal 20cm x 10cm. A altura total prevista para a fundação (sapata corrida + embasamento + radier) é de 1,70m, ficando a cota de fundação 60cm abaixo do terreno natural.

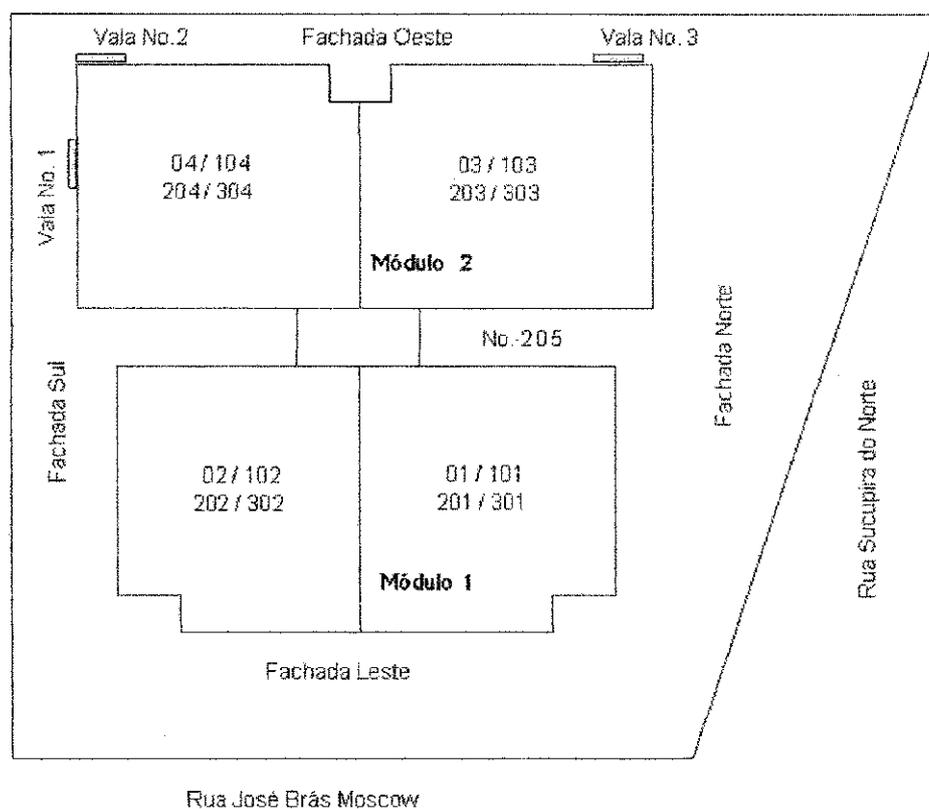
As fundações foram construídas de maneira análoga ao anteriormente descrito, sendo que, em lugar da alvenaria dobrada (20cm de espessura), foi executada alvenaria singela com tijolos de seis furos assentados ao chato (11cm de espessura). Como decorrência, o radier situado na parte superior ficou com uma seção transversal de 11cm x 10cm, sendo menor do que a prevista pelo projeto.

- **Laje de piso dos pavimentos**

As lajes pré-moldadas foram executadas, de acordo com o previsto no projeto estrutural, e com as mesmas características. Em alguns pontos foram criadas paredes para contraventamento do embasamento no nível da fundação.

Apesar do grande risco de desabamento, pois o edifício estava em ruínas, foram coletadas amostras do interior da edificação, quando possível, mesmo sendo prejudicada a escolha dos tijolos. No local foi verificado que as lajes do pavimento térreo estavam rompidas abaixo de sua cota original, devido ao afundamento das paredes, o estado da fundação e como foi construída, também foi observado que não havia aterro em determinados locais.

Na edificação já em ruínas foram escavadas três valas ao longo das fachadas oeste e sul, junto a estrutura pelo Eng. Romilde para retirada de amostras e estudo das causas do desabamento deste edifício.



**Figura 3.1 - Situação, orientação e locação das cavas efetuadas.**

### 3.4 RESULTADOS DO RELATÓRIO FINAL DO EDIFÍCIO AQUARELA.

Para a análise da salinidade do solo e da água do lençol freático na fundação, foram efetuados três furos na área construída, sendo retiradas três amostras de solo e três amostras de água que foram enviadas para o Laboratório de Cerâmica e Argilas do Departamento de Engenharia de Materiais do CCT da UFPB e para a Fundação Instituto tecnológico do Estado de Pernambuco (ITEP).

#### 3.4.1 ENSAIOS QUÍMICOS

##### 3.4.1.1 ANÁLISE QUÍMICA DO LENÇOL FREÁTICO

As amostras de água provenientes do lençol freático coletadas nos furos 1, 2 e 3 foram submetidas à mesma série de análises das amostras do extrato solúvel dos solos. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Análise química da água.

Características Químicas	Furo 1	Furo 2	Furo 3
pH (Extrato de Saturação)	7,41	7,28	7,10
Condutividade elétrica- $\mu$ mhos/cm a 25°C	804	505	701
Cloreto (mg/l)	41,48	24,81	44,31
Carbonato (mg/l)	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato (mg/l)	146,42	256,24	332,50
Sulfato (meq/l)	Ausência	Ausência	Ausência
Cálcio (mg/l)	76,75	40,68	59,12
Magnésio (mg/l)	3,89	18,83	17,01
Potássio (mg/l)	72,47	11,34	14,86
Sódio (mg/l)	18,17	18,63	41,86
Relação de Adsorção de Sódio	2,18	0,60	1,23
Classe da água	C <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>

A soma dos cátions e ânions solúveis em mg/l, indica para água do furo 1 uma quantidade de sais 626,53 mg/l, para o furo 2, 370,53mg/l e para o furo 3 509,66mg/l.

Comparando estes dados com os das especificações da NBR-6118 da ABNT para águas de amassamento de concretos e conteúdo de sais em agregados e com a literatura existente, como Ribeiro (1996), conclui-se que são considerados normais.

Para a Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco (ITEP) foram fornecidas amostras de água. A análise química da água mostrou um pH = 7,4, praticamente neutro, não caracterizando agressividade. Os teores de cloretos (33mg/l) e sulfatos (149,3mg/l) apresentados são considerados baixos, ficando afastada a possibilidade de águas agressivas ao embasamento.

### 3.4.1.2 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

Para o solo foram retiradas amostras do extrato solúvel, que foram submetidas à análise através de métodos constantes do manual de Métodos de Análises de solos da Embrapa 2.32, 2.33, 2.34, 2.35, 2.36, 2.37, 2.38, 2.39, 2.40. A Tabela 3.2 apresenta os resultados do ensaio.

Tabela 3.2 - Análise química do solo.

Características Químicas	Furo 1	Furo 2	Furo 3
pH (Extrato de Saturação)	7,91	7,63	7,97
Condutividade elétrica- $\mu$ mhos/cm	0,34	0,43	0,32
Cloreto (mg/l)	26,59	53,17	35,45
Carbonato (mg/l)	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato (mg/l)	146,42	158,63	134,22
Sulfato (meq/l)	Ausência	Ausência	Ausência
Cálcio (mg/l)	42,48	45,09	30,06
Magnésio (mg/l)	9,11	18,22	10,57
Potássio (mg/l)	6,26	7,43	10,17
Sódio (mg/l)	18,17	17,71	26,68
Porcentagem de saturação	26,66	25,00	28,33
Salinidade	Baixa	Baixa	Baixa
Classe do solo	Normal	Normal	Normal

Como visto na Tabela anterior o solo é de baixa salinidade, teores de agentes agressivos, tais como sulfatos e cloretos, são nulos ou muito baixos.

Para a Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco (ITEP) foram fornecidas amostras do material de aterro, o percentual encontrado de cloretos foi 0,02% e o de sulfatos foi nulo, não caracterizando agressividade.

### **3.4.1.3 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL CONSTITUINTE DO TIJOLO**

Para a Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco (ITEP) foram fornecidas amostras dos tijolos. A análise revelou baixos teores de cloretos e de sulfatos que não comprometiam a sua resistência.

### **3.4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

O Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco obteve os seguintes resultados nos ensaios de resistência a compressão nos tijolos a galga e a chato respectivamente 1,2MPa e 2,0MPa como sendo valores médios.

Para Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco (ITEP) foram fornecidas amostras de água, do material do aterro, de tijolos provenientes da alvenaria afetada pela umidade (alvenaria de embasamento) e da alvenaria não afetada pela umidade (alvenaria de elevação). Os resultados dos ensaios de compressão nos tijolos afetados pela umidade apresentaram resistências médias 1,8MPa e 2,6MPa a galga e ao chato respectivamente, e 3,3MPa ao chato para tijolos não afetados pela umidade.

Para a TECOMAT - Tecnologia de Construção e Materiais Ltda. - foram fornecidas amostras das alvenarias de embasamento e de elevação que permitiram ensaios de blocos de ambas, bem como de dois prismas extraídos do embasamento e um prisma retirado da alvenaria de elevação. Os ensaios apresentaram os seguintes resultados:

- Resistência média à compressão à galga da alvenaria de elevação: 1,6MPa;
- Resistência média à compressão ao chato da alvenaria de elevação: 2,9MPa.
- Resistência média à compressão ao chato da alvenaria de embasamento: 2,4MPa.

Ocorre uma diferença de 20% entre as resistências médias ao chato das alvenarias afetadas e não afetadas pela umidade. Como a procedência dos tijolos é a mesma, conforme revelaram os ensaios, significa dizer que os tijolos da alvenaria de embasamento sofreram uma perda de resistência ao longo dos onze anos do término da obra.

A tabela 3.3 resume os resultados dos ensaios de compressão determinados em diversos laboratórios no estado de Pernambuco.

**Tabela 3.3 - Resistência a compressão de blocos cerâmicos em MPa.**

<b>Laboratório</b>	<b>Blocos de elevação a galga</b>	<b>Blocos de elevação ao chato</b>	<b>Blocos de embasamento a galga</b>	<b>Blocos de embasamento ao chato</b>
DEC/UFPE	1,2	2,0	ND	ND
ITEP	ND	3,3	1,8	2,6
TECOMAT	1,6	2,9	ND	2,4

**Fonte : Laudo técnico - Relatório final do Edifício Aquarela**

Pela Tabela 3.3 é possível comparar as resistências mecânicas dos tijolos afetados e não afetados. Levando em consideração os valores médios das resistências à compressão obtidas pelo ITEP e pela TECOMAT temos:

- Alvenaria de elevação à galga : 1,6MPa;
- Alvenaria de elevação ao chato : 3,1MPa;
- Alvenaria de embasamento ao chato : 2,5MPa;

Isto demonstra uma redução na resistência mecânica ao chato nos tijolos do embasamento. Estes resultados servirão como auxílio e comprovação dos resultados realizados nesta dissertação.

### **3.4.3 ENSAIO DE EFLORESCÊNCIA**

A salinidade dos tijolos foi determinada através de ensaio qualitativo desenvolvido por Ribeiro (1996) em sua dissertação de mestrado com base no método da ASTM C67-62<sup>a</sup>.

Os corpos de prova serrados foram colocados parcialmente imersos em água destilada, assim haverá o transporte por capilaridade da água para a parte da amostra não

imersa. Com o passar do tempo ocorrerá a evaporação, então, caso haja sais solúveis, forma-se um depósito de cor branca.

Os tijolos afetados apresentaram resultado negativo a respeito dos sais solúveis, enquanto os tijolos não afetados apresentaram resultado positivo. A ausência de sais solúveis na alvenaria de embasamento pode ser explicada pela dissolução nas águas do lençol freático, que como foi visto, são de baixa salinidade.

### 3.5 MÉTODOS

Inicialmente estão descritos os equipamentos utilizados, a seguir a preparação das amostras e, finalmente os ensaios realizados.

- Aparato medidor de variação de comprimento dos corpos de prova, equipado com micrômetro de resolução de 0,001mm acoplado a uma barra horizontal de aço cilíndrica que se desloca sob a orientação de uma outra barra vertical de aço cilíndrica. A barra vertical está fixada em uma placa de aço que constitui a base do equipamento. O movimento vertical é necessário para proporcionar uma devida calibração com uma barra prismática de aço-níquel com o comprimento de 120mm para que o micrômetro seja aferido corretamente.

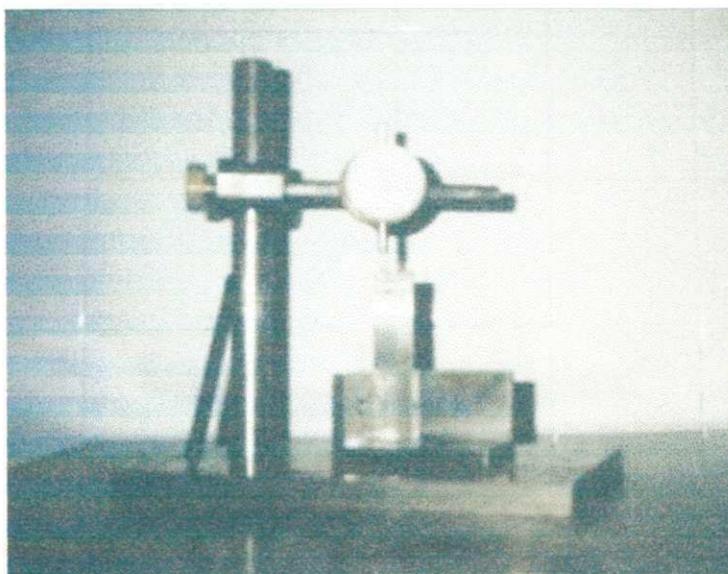


Figura 3.2 - Aparato para medição direta da EPU.

- Dissecador sem marca, utilizado para não permitir a hidratação dos corpos de prova depois de requeimados.
- Estufa da marca Fanem, de secagem e esterilização. Modelo 315SE.
- Mufla da marca Quimis, programável até 1000°C utilizada para a requeima dos corpos de prova, referencia/modelo Q318.D24 com potência de 4000W.
- Máquina de tração marca Goodbrand D-6940 Wheinheim Karl Shroder, para os ensaios de tensão de ruptura a flexão pelo método dos três pontos.
- Sistema de Análises térmicas da marca BP ENGENHARIA - MODELO RB-3000-20 para os ensaios de dilatométrica.

### **3.5.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS**

#### ***3.5.1.1 CORPOS DE PROVA DE 12,0 x 2,0 x 0,5CM E 5,0 x 0,7 x 0,7CM***

Com as amostras das alvenarias afetadas e não afetadas pela umidade, foram confeccionados corpos de prova, estes foram limpos, para a retirada da argamassa de cimento, com o auxílio de uma lixadeira de fios de aço, martelo e talhadeira. Após esta etapa foram confeccionados os corpos de prova através de serragem de marmoraria, e mediram aproximadamente as seguintes dimensões 12,0 x 2,0 x 0,5cm e também 5,0 x 0,7 x 0,7cm.

Foram confeccionados, para cada ensaio de EPU, 140 corpos de prova, sendo 70 retirados da alvenaria afetada pela umidade e 70 da alvenaria não afetada. Os corpos de prova foram organizados em 10 grupos (cinco de alvenaria afetada e cinco de alvenaria não afetada pela umidade) de 14 elementos, medidos, marcados e numerados. O grupo de alvenaria afetada será denominado de “Grupo A” e de alvenaria não afetada “Grupo NA”.

Após a medição dos corpos de prova no aparato anteriormente apresentado (denominada medida inicial), estes foram submetidos a uma requeima que era iniciada em temperatura ambiente e crescia a uma taxa de aumento de 150°C/h e permanecendo 2h após atingir a temperatura de 500°C. Com os corpos de prova já resfriados naturalmente foi realizada nova medição (denominada de EPU atual). Uma terceira medição foi realizada após o tratamento de EPU (denominada de EPU total).

As medições eram realizadas medindo o corpo de prova cinco vezes e descartando a medida que variasse  $\pm 5\%$  da média, com aproximação de duas casas decimais e expressos em mm/m.

Todos os tijolos foram da mesma olaria e supõe-se que os tijolos foram queimados a mesma temperatura, então, por isto, devem ter aproximadamente a mesma resistência mecânica.

### **3.5.1.2 AMOSTRAS DOS PÓS-AFETADOS E NÃO AFETADOS**

Foi retirado material dos tijolos afetados e não afetados, através da quebra pela passagem em um britador, finamente moído no moinho de discos para depois passar na peneira da ABNT N° 200 (0,074mm), com isto foi obtido dois tipos de pó, um afetado e outro não afetado que foram armazenados em dois pequenos sacos fechados, de forma que não entrassem em contato com a umidade do ar. Este procedimento foi necessário para preparar as amostras que foram submetidas aos ensaios de análise química, análise térmica diferencial, análise termogravimétrica e difração de raios-X.

### **3.5.2 ENSAIOS DE EXPANSÃO POR UMIDADE**

Os ensaios que caracterizam a expansão por umidade consistem em medir os corpos de prova após imersão, fervura, panela de pressão ou autoclave através do aparato de medição.

As medidas dos corpos de prova foram realizadas antes e depois de cada ensaio de EPU, e também após terem sido requeimados a 500°C. Desse modo foram obtidas três medidas:

1. O comprimento do corpo de prova serrado;
2. O comprimento após a requeima;
3. O comprimento após o ensaio de expansão por umidade.

A norma utilizada para o ensaio de expansão por umidade em tijolos, foi a ISO 10545-10/NBR 13818 que utiliza água fervente por 24h, e refere-se a ensaios para certificação de placas cerâmicas que serve para azulejos. Também foram consultadas as

normas BS 6431: Parte 21 de 1984, equivalente a EN 155, que tratam da expansão por umidade em azulejos. A norma utilizada para o autoclave foi da ASTM C 370 – 88 de 1994.

Para os ensaios de panela de pressão e imersão não existiam normas. A realização do ensaio de imersão foi feita com base em outros trabalhos, e o ensaio de panela de pressão feito por analogia com o ensaio de fervura e autoclave.

### **3.5.2.1 IMERSÃO EM ÁGUA**

Para cada período de tratamento um “Grupo A” e outro “Grupo NA” foram imersos em um recipiente plástico com água destilada, o suficiente para submergi-los completamente. Após os seguintes períodos de tratamento com, 15, 30, 45, 60 e 90 dias um grupo de cada tipo foi retirado da imersão e medido. Depois de medidos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tensão de ruptura à flexão.

Para o ensaio de imersão não existe uma metodologia definida, mas apenas alguns procedimentos realizados por outros pesquisadores.

### **3.5.2.2 FERVURA**

Os corpos de prova eram colocados em água destilada fervente durante diferentes períodos, incluindo 24h como prescreve a norma NBR-13818. Os corpos de prova foram fervidos durante os tempos de 2, 24, 36, 48 e 72h.

Como a norma só prescreve o ensaio até 24 horas, o tempo superior do ensaio serviu para mostrar que o tempo da norma é suficiente, e acima deste valor a EPU encontrada é insignificante para os corpos de prova em questão.

### **3.5.2.3 PANELA DE PRESSÃO**

Cinco grupos A e 5 grupos NA, foram colocados numa panela de pressão, com a pressão calibrada em 0,1034MPa (15psi). Após cada período de 2h, 4h, 8h, 16h e 24h eram retirados um grupo A e outro grupo NA. Como já foi dito anteriormente, para este tipo de ensaio não existe norma.

---

### **3.5.2.4 AUTOCLAVE**

Cinco grupos de cada tipo (grupo A e grupo NA) foram colocados no autoclave com 1,8 litros de água, o tubo na tampa foi fechado e a contagem do tempo de ensaio foi iniciada após o vapor começar a sair pelo tubo na tampa do autoclave. O ensaio de autoclavagem é realizado segundo a norma C370, utilizando uma pressão de vapor de 1,035 MPa (150psi). Depois de cada período de 1h, 2h, 3h, 4h e 5h eram retirados um grupo A e outro NA. Também foi realizado um ensaio com uma autoclavagem por 10h com 28 corpos de prova, 14 afetados e 14 não afetados, para verificação de uma EPU futura maior, e confirmar que o tempo de ensaio de 5 horas era suficiente para este tipo de corpo de prova.

### **3.5.2.5 DILATOMETRIA**

Este ensaio tem por objetivo determinar a dilatação térmica do material. Um corpo de prova com dimensões aproximadas de 5 x 0,5 x 0,5cm era colocado numa célula constituída por um cilindro de vidro que estava acoplado a uma unidade medidora de deformações.

A amostra era submetida a uma elevação de temperatura, a uma taxa de 10°C/min, até atingir 500°C quando, então, o forno automaticamente era desligado e o resfriamento ocorria de forma natural até a temperatura ambiente. O resultado era processado por um computador ligado a este sistema, e apresentado na forma de uma curva “deformação x temperatura”, onde a EPU é a diferença entre os pontos inicial e final da curva no ciclo de aquecimento e resfriamento, expressos em mm/m, com uma precisão de 3 casas decimais.

O ensaio de dilatometria foi realizado em 73 corpos de prova de dimensões 5 x 0,7 x 0,7cm. O primeiro grupo (Grupo 1) era composto por um total de 22 corpos de prova, serrados e ensaiados, destes, 6 corpos de prova sem nenhum tratamento (naturais) foram colocados em uma estufa por um período de 24 horas para retirada da água de capilaridade para assim, encontrar a EPU atual. O restante foi submetido a um tratamento térmico a 500°C, aos ensaios de fervura por 2 horas e autoclave por 5 horas a 1,034MPa para encontrar a EPU total. Com os resultados do autoclave e dos corpos de prova naturais

encontra-se a EPU futura que é a diferença entre a EPU total e a EPU atual ( $EPU_{total} - EPU_{atual}$ ).

Um segundo grupo (Grupo 2) era formado por corpos de prova que foram serrados após o ensaio da tensão de ruptura a flexão, ou seja, que seguiram a seguinte seqüência:

- 1- queimados a 500°C;
- 2- submetidos aos ensaios de expansão (imersão, fervura, panela de pressão e autoclave);
- 3- ao ensaio de tensão de ruptura à flexão;
- 4- serrados com as dimensões de 5 x 0,7 x 0,7cm;
- 5- colocados na estufa por 24 horas;
- 6- ensaiados no dilatômetro.

Para o 1º Grupo de corpos de prova as dilatométrias foram organizadas da seguinte forma:

- 3 Dilatométrias dos corpos de prova não afetados e naturais;
- 3 Dilatométrias dos corpos de prova afetados e naturais;
- 5 Dilatométrias dos corpos de prova não afetados e fervura por 2h;
- 5 Dilatométrias dos corpos de prova afetados e fervura por 2h;
- 3 Dilatométrias dos corpos de prova não afetados autoclavados por 5h;
- 3 Dilatométrias dos corpos de prova Afetados e autoclavados por 5h;

Para o 2º Grupo de corpos de prova as dilatométrias foram organizadas da seguinte forma:

- 2 Dilatométrias dos corpos de prova não afetados pela umidade e imersos por 15 dias;
  - 3 Dilatométrias dos corpos de prova afetados pela umidade e imersos por 15 dias;
  - 4 Dilatométrias dos corpos de prova não afetados pela umidade e imersos por 90 dias;
  - 3 Dilatométrias dos corpos de prova afetados pela umidade e imersos por 90 dias;
  - 2 Dilatométrias dos corpos de prova não afetados e fervura por 2h;
-

- 2 Dilatometrias dos corpos de prova afetados e fervura por 2h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova não afetados e fervura por 24h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova afetados e fervura por 24h;
- 3 Dilatometrias dos corpos de prova não afetados e fervura por 72h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova afetados e fervura por 72h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova não afetados e panela de pressão por 2h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova afetados e panela de pressão por 2h;
- 4 Dilatometrias dos corpos de prova não afetados e panela de pressão por 24h;
- 3 Dilatometrias dos corpos de prova afetados e panela de pressão por 24h;
- 3 Dilatometrias dos corpos de prova não afetados e autoclavados por 1h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova afetados autoclavados por 1h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova não afetados autoclavados por 5h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova afetados autoclavados por 5h;
- 3 Dilatometrias dos corpos de prova não afetados e autoclavados por 10h;
- 2 Dilatometrias dos corpos de prova afetados e autoclavados por 10h;

### 3.5.3 EXPANSÃO POR UMIDADE ATUAL

É a expansão por umidade que o corpo de prova sofreu até o momento em que é medido. É calculada pela dilatométrica no grupo I e também pelo método de medição direta através da equação 3.1. O corpo de prova é queimado para a retirada de água livre e absorvida, diminuindo suas dimensões e obtendo dessa forma, o tamanho supostamente original de quando foi fabricado. É calculada como uma taxa de variação, seguindo a norma C370 – 88 da ASTM.

#### Equação 3.1

$$EPU_{atual} = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$$

Onde:

“L<sub>1</sub>” é o comprimento da peça cerâmica (mm);

“L<sub>0</sub>” é o comprimento após a queima (mm);

### 3.5.4 EXPANSÃO POR UMIDADE TOTAL

É a expansão por umidade que o corpo de prova sofre após ser submetido a um tratamento de envelhecimento acelerado (imersão, fervura, panela de pressão ou autoclave). É supostamente a máxima expansão que o corpo de prova pode sofrer com o passar do tempo. Para os corpos de prova da medição direta é calculada como uma taxa de variação (equação 3.2) seguindo a norma C370 – 88 da ASTM.

#### Equação 3.2

$$EPU_{total} = \frac{L_2 - L_0}{L_0}$$

Onde:

“L<sub>2</sub>” é o comprimento da peça cerâmica após um tratamento de expansão(mm);

“L<sub>0</sub>” é o comprimento após a queima (mm);

### 3.5.5 EXPANSÃO POR UMIDADE FUTURA

É a expansão que o corpo de prova ainda pode sofrer durante a sua vida útil. Para os corpos de prova da medição direta é calculada pela equação 3.3 a seguir.

#### Equação 3.3

$$EPU_{futura} = EPU_{total} - EPU_{atual}$$

### 3.5.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

#### 3.5.6.1 ANÁLISE QUÍMICA DOS TIJOLOS

Os tijolos foram moídos e ensacados como anteriormente descrito. Depois foram remetidos para o Laboratório de Análises Minerais (LAM CCT/PRAI/UEPB Campina Grande), onde foram devidamente analisados e determinados os seguintes componentes: óxidos de cálcio, magnésio, sódio, potássio, carbonato, bicarbonato, cloretos, e sulfatos.

### ***3.5.6.2 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL***

O método da análise térmica diferencial consiste no aquecimento, em velocidade constante, do material que se deseja analisar juntamente com uma substância termicamente inerte, como o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) calcinado, registrando as diferenças de temperatura entre o padrão inerte e o material ensaiado. Quando ocorrem transformações endo ou exotérmicas aparecem deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial.

Os pós dos tijolos foram acondicionados em pequenos sacos de forma a não entrarem em contato com a umidade do ar. A análise térmica diferencial (ATD) foi realizada em equipamento de Análises Térmicas da BP Engenharia modelo RB12, operando a  $12,5^\circ C/min$  atingindo até a temperatura de  $1000^\circ C$ .

### ***3.5.6.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA***

A análise termogravimétrica consiste na pesagem do material enquanto é aquecido em velocidade constante, o que permite o registro das variações de massa em função da temperatura que chega a  $1000^\circ C$ . O material dos tijolos afetados e não afetados são acondicionados em pequenos sacos de forma a não entrar em contato com umidade do ar.

A análise termogravimétrica foi realizada em equipamento de Análises Térmicas RB-3000-20, constitui-se na colocação de pequena porção do pó no compartimento adequado.

### ***3.5.6.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X***

A difração de raios-X consiste em difratar um feixe de raios-X com radiação  $K\alpha$  do cobre de comprimento de onda  $\lambda=1.5418\text{Å}$  produzido no tubo de raios-X, com uma varredura de  $2$  a  $60^\circ$  sobre o pó dos tijolos, colocado em uma placa rebaixada. Cada grupo de planos cristalinos dos minerais existente no pó irá difratar os raios-X em ângulos diferentes e registrados. As duas amostras dos pós, denominadas de afetada e não afetadas, foram enviadas a UFPB Campus I em João Pessoa, onde foi realizado o ensaio de difração de raios-X.

### 3.5.7 ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO

O ensaio de tensão de ruptura à flexão, é também conhecido como módulo de ruptura a flexão, corresponde à resistência que o material oferece quando submetido à ruptura por flexão em três pontos. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 13818 com corpos de prova que não foram utilizados nos ensaios de EPU, totalizando 60 corpos de prova, e os que foram utilizados nos ensaios de EPU, num total de 540 corpos de prova, os quais foram rompidos ainda úmidos (após 3 horas de saírem do ensaio de EPU) e a outra metade dos corpos de prova ficaram 24h na estufa para serem ensaiados no estado seco. O módulo de ruptura foi determinado para cada tipo de amostra, quer tenha sofrido tratamento de EPU (imersão, fervura, panela de pressão e autoclave) com seus diferentes tempos de tratamento, úmidos e secos.

Este ensaio consiste na colocação do corpo de prova apoiado em duas barras equidistantes que constituíam a base, de modo que uma outra barra tocasse no centro do corpo de prova realizando a flexão (métodos dos três pontos), até que o corpo de prova rompia-se com a carga aplicada, o valor da carga sob a qual o corpo se rompia era apresentado no visor do painel de controle, era aplicada a uma velocidade de 0,5mm/min, segundo o método proposto pela ASTM D - 790/1986, e calculada como segue:

#### Equação 3.4

$$MRF = \frac{3P * l}{2b * e^2}$$

Onde:

“MRF” é o modulo de ruptura à flexão (MPa);

“P” é a carga de ruptura;

“l” é a distancia entre os apoios da máquina;

“b” é a largura do corpo de prova;

“e” é a espessura do corpo de prova.

O resultado da tensão de ruptura a flexão foi obtido através da média dos valores individuais de 7 corpos de prova, calculados através da equação acima.

Para a análise dos resultados do módulo de resistência à flexão foi utilizado o seguinte critério: Em cada grupo de 7 valores foi calculada a média dos valores considerando os resultados que ficassem dentro do desvio padrão de 10%, ou seja, os resultados que apresentassem valor 10% acima da média ou abaixo da média foram descartados pois demonstraram resultados incoerentes.

Com todos os resultados em mãos podemos analisar os resultados, fazer comparações entre os valores antes e depois dos ensaios e analisar em relação a afetados pela umidade e não afetados pela umidade.

### 3.6 FLUXOGRAMA DA PESQUISA

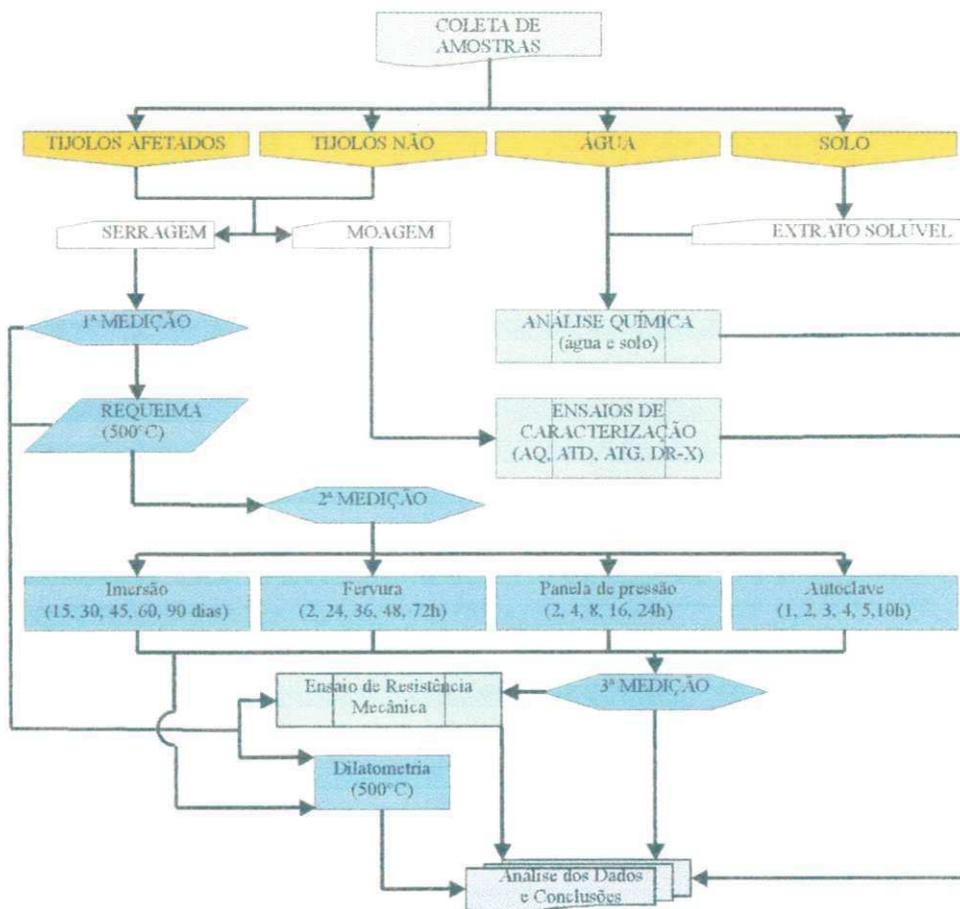


Figura 3.3 - Fluxograma da pesquisa.

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no decorrer desta pesquisa, com os ensaios de expansão por umidade, ensaios de caracterização, e tensão de ruptura a flexão.

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EXPANSÃO POR UMIDADE

#### 4.1.1 IMERSÃO

Os resultados da EPU total dos corpos de prova submetidos à imersão e medidos pelo método de medição direta estão exibidos na Figura 4.1.

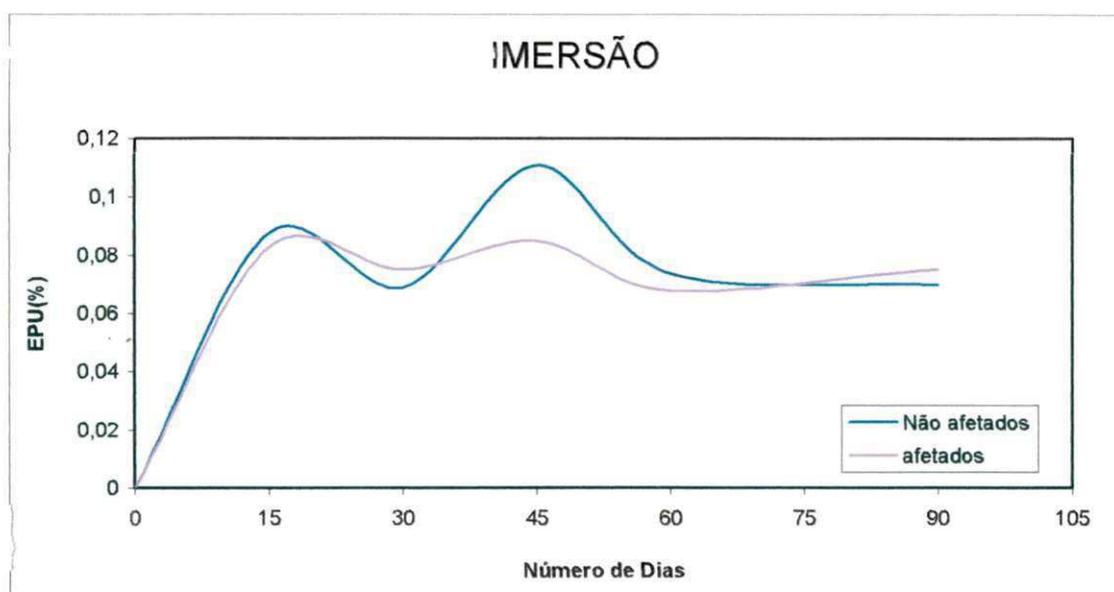


Figura 4.1 - EPU média total dos corpos de prova submetidos a imersão.

Os corpos de prova imersos depois da requeima obtiveram uma expansão semelhante até os primeiros 30 dias, entretanto a partir do 45º dia de imersão a expansão dos corpos de prova não afetados foi maior, e entre o 60º e o 90º dia as expansões tornaram a igualar-se, o que indica uma tendência para que a expansão total seja igual. Neste tratamento tivemos uma expansão média de 0,8mm/m, superior ao colocado em norma de 0,3mm/m

#### 4.1.2 FERVURA

Os resultados da EPU total dos corpos de prova submetidos à fervura e medidos pelo método de medição direta estão exibidos na Figura 4.2.

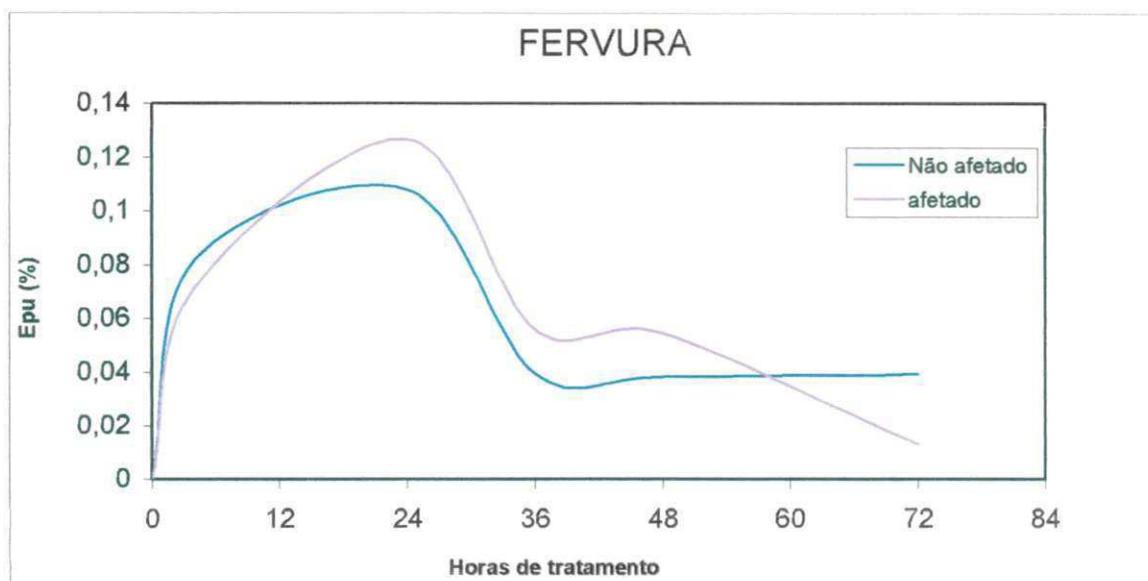


Figura 4.2 - EPU média total dos corpos de prova submetidos a fervura.

Na fervura, o tempo utilizado foi superior ao da norma que é fixado em 24h de tratamento. Pode-se observar que a expansão dos corpos de prova afetados e não afetados são praticamente iguais até as primeiras 12h de tratamento, após este tempo os corpos de prova afetados pela umidade têm uma maior expansão que os não afetados, isso nos informa que houve uma maior ré-hidratação nestes corpos.

A partir das 24h de tratamento é possível observar uma queda das EPU que ocorreu devido à perda de material por desagregação dos corpos de prova e que quando medidos novamente apresentaram dimensões menores. Após as 24h de tratamento e até o final do ensaio, os corpos de prova afetados tem uma maior desagregação, pois estavam submetidos a um meio mais agressivo que os corpos de prova não afetados pela umidade, assim têm uma resistência menor ao desgaste. Sua EPU tem uma média nas primeiras 24h de tratamento de 1,0mm/m, que é bastante superior ao limite de 0,3mm/m estabelecido por norma.

#### 4.1.3 PANELA DE PRESSÃO

Os resultados da EPU total dos corpos de prova submetidos à panela de pressão e medidos pelo método de medição direta estão contidos na Figura 4.3.

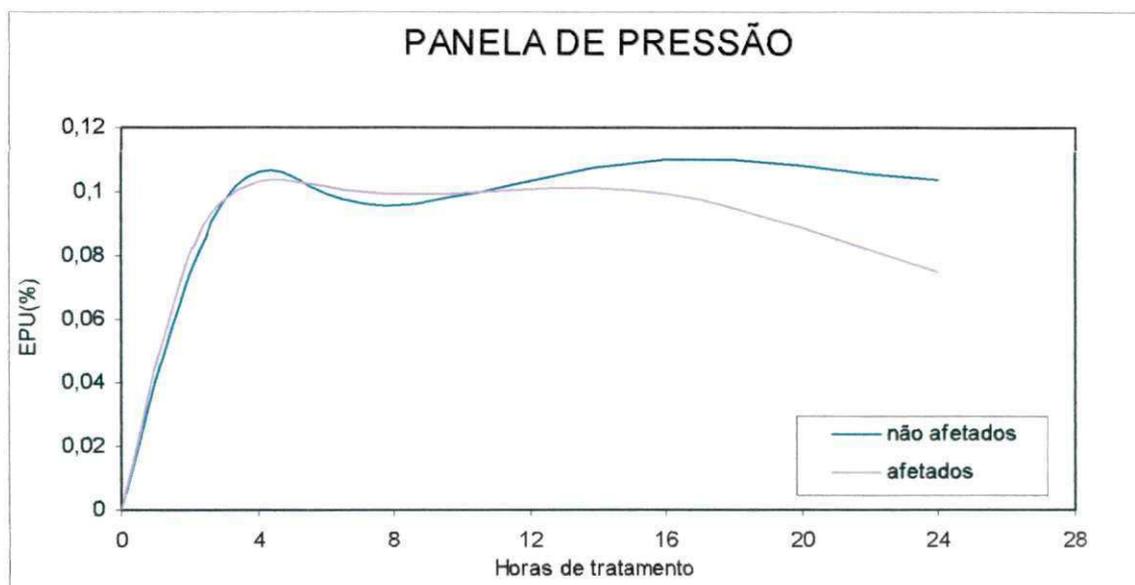


Figura 4.3 - EPU média total dos corpos de prova submetidos a panela de pressão.

No ensaio de panela de pressão que não é normalizado, as expansões dos corpos de prova afetados e não afetados são praticamente iguais, com uma expansão um pouco maior para os corpos de prova afetados até 12h de tratamento. A partir de aproximadamente 16h de tratamento os corpos de prova afetados e não afetados começam a desagregar, mais fortemente os corpos de prova afetados, o que justifica a redução da EPU nos períodos finais de tratamento.

Assim como na fervura, a água na panela de pressão também atua sobre os corpos de prova provocando o desagregamento. Na panela de pressão este fenômeno ocorre de forma mais intensa que nos corpos de prova submetidos à fervura. Também observa-se que os corpos de prova afetados sofrem um maior desgaste que os não afetados, e temos uma EPU média nas primeiras 12 horas de tratamento de 1,0mm/m, superior ao colocado em norma de 0,3mm/m

#### 4.1.4 AUTOCLAVE

Os resultados da EPU total dos corpos de prova submetidos ao autoclave e medidos pelo método de medição direta estão exibidos na Figura 4.4

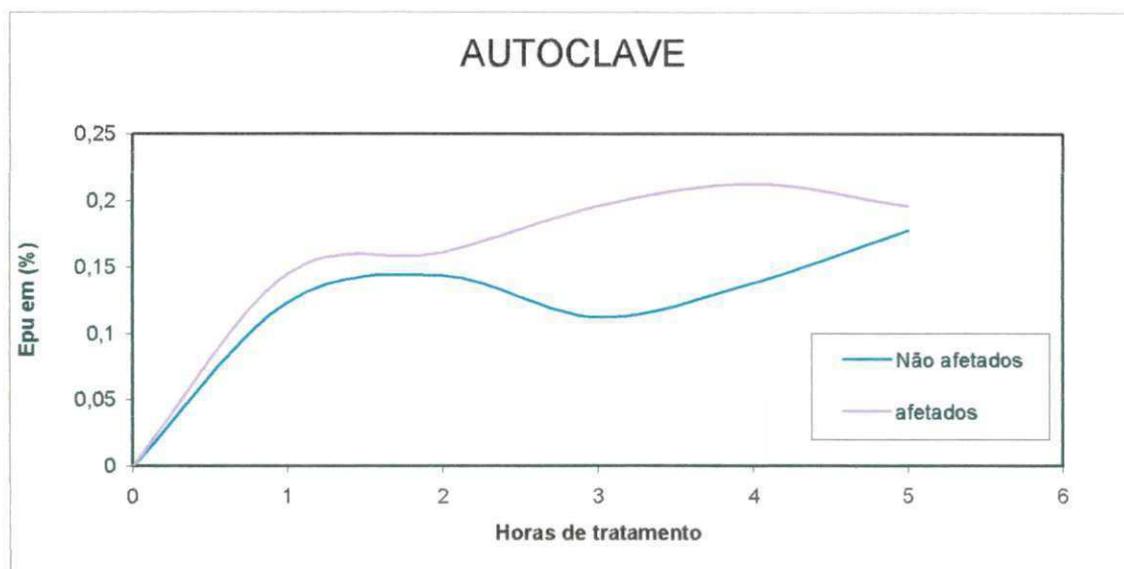


Figura 4.4 - EPU média total dos corpos de prova submetidos ao autoclave.

No autoclave, que é o ensaio mais severo para a determinação da EPU, observa-se inicialmente que a expansão por umidade dos corpos de prova afetados e não afetados foi a maior expansão entre os métodos de ensaios, chegando até a duplicar de valor da expansão obtido por outros métodos. Observando a Fig. 4.4 nota-se que os corpos de prova afetados tem uma maior expansão que os corpos de prova não afetados em todo o tratamento.

Apesar de ser o ensaio mais rigoroso não ocorreu o desagregamento do material dos corpos de prova pelo fato que, no autoclave, os corpos de prova não estão em contato

direto com a água. A expansão média até 5h de tratamento ficou em aproximadamente 1,9mm/m.

#### 4.1.5 DILATOMETRIA

As Figuras que apresentam os resultados das dilatometrias estão no Anexo 1.

Os valores médios das EPUs encontradas por dilatometria estão apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4

A Tabela 4.1 nos apresenta os resultados da média de valores das dilatometrias dos corpos de prova ensaiados originais, que demonstram a EPU atual e autoclavados por 5 horas, que demonstram a EPU total, todos do grupo 1:

**Tabela 4.1 - Resultados das EPUs por dilatometria (grupo 1 em mm/m).**

<b>AMOSTRAS</b>	<b>EPUatual</b>	<b>EPUtotal</b>	<b>EPUfuturo</b>
Tijolos afetados	1,73	2,70	0,97
Tijolos não afetados	0,43	2,45	2,02

Podemos concluir que os tijolos afetados pela umidade expandiram mais de 200% que os tijolos não afetados pela umidade. Quanto a EPUtotal constata-se que se ambos os tijolos estiverem sendo afetados pela umidade provavelmente terão a mesma expansão por umidade, visto que os tijolos não afetados poderão expandir cerca de 2,02 mm/m enquanto os tijolos afetados só expandirão 0,97mm/m. Estes valores só foram alcançados numa condição de autoclavagem de 5 horas, se mudássemos as condições provavelmente obteríamos outros valores de expansão por umidade totais e futuras.

Na Tabela 4.2 temos os valores médios das EPUs totais por imersão nas condições de 15 dias e 90 dias, fervura por 2, 24 e 72 horas, panela de pressão por 2 e 24 horas e autoclave por 1, 5 e 10 horas, depois de terem sido tratados termicamente, rompidos no ensaio de tensão de ruptura a flexão e serrados.

**Tabela 4.2 - Resultados das EPU's totais por dilatométrica submetidos a imersão, fervura, panela de pressão e autoclave (grupo 2 em mm/m).**

<b>Condição de ensaio</b>	<b>Afetados</b>	<b>Não afetados</b>
Imersão 15 dias	0,30	0,40
Imersão 90 dias	0,50	0,45
Fervura por 2 horas	0,30	0,60
Fervura 24 horas	0,75	0,45
Fervura 72 horas	0,60	0,80
Panela de pressão 2 horas	0,50	0,45
Panela de pressão 24 horas	0,80	1,20
Autoclave 1 hora	1,60	1,60
Autoclave 5 horas	2,00	1,30
Autoclave 10 horas	3,10	2,80

Os resultados comprovam que após o tratamento térmico as diferenças entre corpos de prova afetados e não afetados diminuíram drasticamente, ou até mesmo que os corpos de prova não afetados expandiram mais que os corpos de prova afetados pela umidade, como mostra na condição de ensaio de fervura por 2 horas.

Outra conclusão é que com o aumento da severidade do ensaio, houve uma maior EPU como se comprova com a condição de autoclave a 5 e 10 horas.

#### **4.1.6 EXPANSÃO POR UMIDADE ATUAL**

Na Tabela 4.3 estão descritos os resultados por medição direta da EPU<sub>atual</sub> média, isto é todos os corpos de prova foram medidos após serragem, submetidos ao tratamento térmico a 500°C, medidos novamente, e calculado um valor médio. Para a determinação da EPU<sub>atual</sub> não importa qual tratamento o corpo de prova será submetido, pois constitui uma etapa posterior, então as mesmas condições de ensaio estão presentes para todos os corpos de prova.

**Tabela 4.3 - Dados da EPUatual média de todos os corpos de prova submetidos a requema (mm/m).**

	<b>Imersão</b>	<b>Fervura</b>	<b>P.Pressão</b>	<b>Autoclave</b>	<b>Média</b>
Media da EPU atual não afetados	0,151	0,141	0,138	0,157	0,146
Media da EPU atual afetados	0,150	0,162	0,188	0,148	0,162

**OBS: Todos os resultados dos corpos de prova foram considerados.**

Os resultados demonstram que na média geral a EPUatual foi maior nos corpos de prova afetados pela umidade. Cerca de 50% dos corpos de prova da EPUatual média dos afetados foi superior a dos não afetados, aproximadamente 25% teve a mesma expansão, e aproximadamente 25% dos corpos de prova dos tijolos não afetados tem uma EPUatual média maior do que os afetados.

Como era esperado a expansão nos corpos de prova afetados foi maior que nos corpos de prova não afetados.

#### **4.1.7 EXPANSÃO POR UMIDADE TOTAL**

Pode-se observar nas Tabelas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 que as diferenças entre afetados e não afetados são mínimas, porque após o tratamento térmico a maior expansão nos corpos de prova afetados foi eliminada, e com o aumento na severidade dos ensaios a EPUtotal aumenta progressivamente.

A Tabela 4.4 exhibe os dados da EPUtotal dos corpos de prova da imersão e seus tratamentos, os valores estão em mm/m.

**Tabela 4.4 - EPUtotal dos corpos de prova da imersão (mm/m).**

<b>Tratamento</b>	<b>Não afetados</b>	<b>Afetados</b>
15 dias	0,88	0,83
30 dias	0,69	0,75
45 dias	1,11	0,85
60 dias	0,74	0,68
90 dias	0,70	0,75

Este resultado mostra que há uma maior expansão média nos corpos de prova não afetados, e que com o aumento do tempo de ensaio uma maior expansão não ocorreu, o que pode sugerir que um maior número de dias não provoca uma expansão significativa, posto em outras palavras, para a avaliação da EPU o aumento do tempo de ensaio foi indiferente.

A Tabela 4.5 exhibe os dados da EPU<sub>total</sub> dos corpos de prova da fervura e seus tratamentos.

**Tabela 4.5 - EPU<sub>total</sub> dos corpos de prova da fervura (mm/m).**

<b>Tratamento</b>	<b>Não afetados</b>	<b>Afetados</b>
2h	0,82	0,72
24h	1,08	1,27
36h	0,40	0,56
48h	0,38	0,54
72h	0,39	0,13

De acordo com a norma de expansão por umidade os dados a serem analisados são do tratamento por um período de 24 horas, e que demonstra uma maior expansão para os corpos de prova afetados pela umidade. O aumento da severidade causou um problema de desagregação na superfície do material, prejudicando as medidas, principalmente nos corpos de prova afetados quando ensaiados por períodos de 72 horas.

A Tabela 4.6 exhibe os dados da EPU<sub>total</sub> dos corpos submetidos à panela de pressão e seus tratamentos.

**Tabela 4.6 - EPU<sub>total</sub> dos corpos de prova da panela de pressão(mm/m).**

<b>Tratamento</b>	<b>Não afetados</b>	<b>Afetados</b>
2h	0,73	0,80
4h	1,06	1,03
8h	0,95	1,00
16h	1,10	0,99
24h	1,04	0,75

Não existe norma para o ensaio de panela de pressão. Sua severidade é maior que o ensaio por fervura, isto é comprovado quando comparados os resultados das Tabelas 4.5 e 4.6. Os resultados da Tabela 4.6 devem ser considerados com cautela devido ao fato de que ocorreu desagregação do material a partir das 4 horas de ensaio.

A Tabela 4.7 exibe os dados da EPU<sub>total</sub> dos corpos de prova submetidos ao autoclave e seus tratamentos.

**Tabela 4.7 - EPU<sub>total</sub> dos corpos de prova do autoclave (mm/m).**

<b>Tratamento</b>	<b>Não afetados</b>	<b>Afetados</b>
1 hora	1,45	1,23
2 horas	1,61	1,44
3 horas	1,96	1,12
4 horas	2,13	1,38
5 horas	1,96	1,78

**OBS: Todos os resultados dos corpos de prova foram considerados**

Os resultados da Tabela 4.7 demonstram o quanto aproximadamente os corpos de prova podem expandir durante sua vida útil. Pela norma o tratamento a ser considerado é o tempo de 5 horas, que resulta numa expansão de 1,96mm/m e 1,78mm/m para corpos de prova não afetados e afetados respectivamente, estes resultados quando comparados às expansões da EPU<sub>total</sub> da fervura são até 220% e 180% maiores.

A respeito do aumento do tempo de ensaio na autoclavagem os resultados não demonstram grandes diferenças, pelo fato que os corpos de prova em cada tratamento são diferentes, se por acaso os mesmos corpos de prova fossem mantidos em todos os tratamentos, haveria provavelmente um aumento nos valores da EPU<sub>total</sub> gradativamente.

#### **4.1.8 EXPANSÃO POR UMIDADE FUTURA**

A expansão por umidade futura, que é o resultado da diferença entre a EPU<sub>total</sub> e EPU<sub>atual</sub>, variaram de acordo com a severidade do ensaio de expansão por umidade, e com o tempo de tratamento ao qual o corpo de prova foi submetido.

A Tabela 4.8 demonstra os resultados das expansões por umidade futura no tratamento da imersão.

**Tabela 4.8 - EPUfutura dos corpos de prova da imersão (mm/m).**

<b>Tratamento</b>	<b>Não afetados</b>	<b>Afetados</b>
15 dias	-0,036	-0,073
30 dias	-0,071	-0,093
45 dias	-0,037	-0,019
60 dias	-0,116	-0,050
90 dias	-0,087	-0,131

Todos os corpos de prova expandiram com o tratamento a imersão, mas não o suficiente para ultrapassar os comprimentos registrados quando da EPUtotal.

A Tabela 4.9 demonstra os resultados das expansões por umidade futura no tratamento com a fervura.

**Tabela 4.9- EPUfutura dos corpos de prova da fervura (mm/m).**

<b>Tratamento</b>	<b>Não afetados</b>	<b>Afetados</b>
2 horas	-0,075	-0,051
24 horas	-0,024	-0,050
36 horas	-0,092	-0,123
48 horas	-0,117	-0,108
72 horas	-0,100	-0,156

Nestes ensaios o tratamento não foi suficiente para provocar uma maior expansão que a ocorrida durante o seu tempo de vida na edificação ( $EPU_{atual} > EPU_{total}$ ).

Os corpos de prova afetados obtiveram uma expansão por umidade aproximadamente 50% menor que os tijolos não afetados, mas devido a ordem de grandeza e peculiaridade dos corpos de prova pode-se concluir que na prática é a mesma expansão.

A Tabela 4.10 é o resultado das expansões por umidade futura no tratamento com a panela de pressão.

**Tabela 4.10 - EPUfutura dos corpos de prova da panela de pressão (mm/m).**

Tratamento	Não afetados	Afetados
2 horas	-0,041	-0,118
4 horas	-0,052	-0,081
8 horas	-0,027	-0,121
16 horas	-0,048	-0,058
24 horas	-0,031	-0,103

Os resultados da Tabela 4.10, como também nas anteriores, demonstram uma EPUfutura negativa. O que a princípio parece uma incoerência é perfeitamente explicável, pois a metodologia de cálculo na equação  $EPU_{futura} = EPU_{total} - EPU_{atual}$ , pode chegar a este resultado bastando que a  $EPU_{atual}$  tenha um valor numérico superior a  $EPU_{total}$ , o que de fato ocorreu. Isto é explicado pelo fato dos tijolos terem sofrido grande expansão durante sua vida útil, e o tratamento de expansão não foi suficiente para promover uma expansão que supere as medidas anteriores ao tratamento térmico, ou seja, a medida inicial dos ensaios da EPU.

Os corpos de prova afetados pela umidade obtiveram uma EPUfutura menor que os corpos de prova não afetados, aproximadamente 140%, pelo fato da  $EPU_{atual}$  ser maior nos corpos de prova afetados.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados das expansões por umidade futura no tratamento com a autoclave.

**Tabela 4.11 - EPUfutura dos corpos de prova do autoclave (mm/m).**

Tratamento	Não afetados	Afetados
1 hora	-0,001	0,024
2 horas	-0,007	0,002
3 horas	-0,016	0,016
4 horas	-0,013	0,000
5 horas	-0,005	0,048

Como a  $EPU_{total}$  neste ensaio foi maior que a  $EPU_{atual}$ , os resultados foram positivos, o que significa que foi o único ensaio com severidade o suficiente para provocar uma expansão suficientemente grande para ultrapassar a medida da expansão inicial, desse modo, o corpo de prova pode expandir ainda mais, bastando aumentar a severidade do ensaio.

Na prática tal investigação não tem sido feita, pois provavelmente a vida útil da peça cerâmica é menor que o tempo para se chegar a tamanha expansão.

A Tabela 4.12 demonstra os valores das EPUs da medição direta e das EPUs da dilatométrica a fim de comparação.

**Tabela 4.12 - Comparação das EPUs entre medição direta e dilatométrica.**

<b>Tratamento</b>	<b>Medição direta (mm/m)</b>	<b>Dilatométrica (mm/m)</b>
Imersão por 15 dias	0,84	0,40
Imersão por 90 dias	0,73	0,50
Fervura por 2 horas (grupo 1)	ND	0,75
Fervura por 2 horas (grupo 2)	0,77	0,45
Fervura 24 horas	1,17	0,60
Fervura 72 horas	0,26	0,70
Panela de pressão 2 horas	0,76	0,50
Panela de pressão 24 horas	0,90	1,00
Autoclave 1 hora	1,34	1,60
Autoclave 5 horas (grupo 1)	ND	2,57
Autoclave 5 horas (grupo 2)	1,87	1,70
Autoclave 10 horas	ND	2,95

São claras as diferenças entre os dois métodos, sempre prevalecendo que a medição direta resulta em valores de expansão maiores que na dilatométrica, a não ser nos ensaios mais severos.

A diferença entre a fervura de 72 horas e panela de pressão de 24 horas, reside no fato de que no processo para a medida direta houve degradação dos corpos de prova, o que não existiu no caso da dilatométrica em que o corpo de prova já estava expandido, e as medidas do dilatômetro são mais precisas.

Analisando os resultados da expansão por umidade por medição direta (EPU<sub>atual</sub>, EPU<sub>total</sub>, EPU<sub>futura</sub>) e por dilatométrica, cada corpo de prova se comporta diferentemente, pois temos retrações que variaram de 0,20mm/m até corpos de prova que retraíram 4,09mm/m independentes de serem afetados ou não afetados. A baixa expansão para as amostras pode ser explicada pela existência de microtrincas que não permitiram o retorno às mesmas condições quando da saída dos fornos. Pois para remover estas microtrincas seriam necessárias temperaturas acima de 800°C onde aconteceria sinterização permitindo uma diminuição do seu comprimento.

Temos que analisar os valores por tempo, em relação ao início do ensaio, e não em relação ao tempo anterior, pois os corpos de prova são outros, o que resulta em expansões diferentes, isto explica porque com o aumento da severidade, a expansão em determinado tempo é inferior a expansão ocorrida num ensaio com uma severidade menor.

## **4.2 RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

### **4.2.1 ANÁLISE QUÍMICA DOS TIJOLOS**

As duas amostras de tijolos foram analisadas para as seguintes determinações: PR, SiO<sub>2</sub>, RI, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O. Conforme tabela 4.13

Tabela 4.13 – Análise química dos tijolos afetados e não afetados.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	AFETADOS	NÃO AFETADOS
Pr (Perda ao rubro)	3,56%	3,35%
SiO <sub>2</sub> (Óxido de silício)	57,35%	56,35%
RI (Resíduo insolúvel)	2,73%	2,02%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de ferro)	7,58%	8,30%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de alumínio)	26,07%	27,40%
Cão (Óxido de cálcio)	1,68%	1,46%
MgO (Óxido de magnésio)	Traços	Traços
Na <sub>2</sub> O (Óxido de sódio)	0,38%	0,82%
K <sub>2</sub> O (Óxido de potássio)	0,42%	0,18%

Os resultados mostram a aproximada igualdade entre a amostra afetada e não afetada pela umidade, com uma pequena diferença em relação à perda ao rubro para a amostra afetada pela umidade o que indica a saída da água. Pode concluir que os compostos químicos não foram alterados pela expansão por umidade.

#### 4.2.2 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL

A Figura 4.5 apresenta o resultado de duas análises térmicas, uma afetada pela umidade e outra não afetada pela umidade.

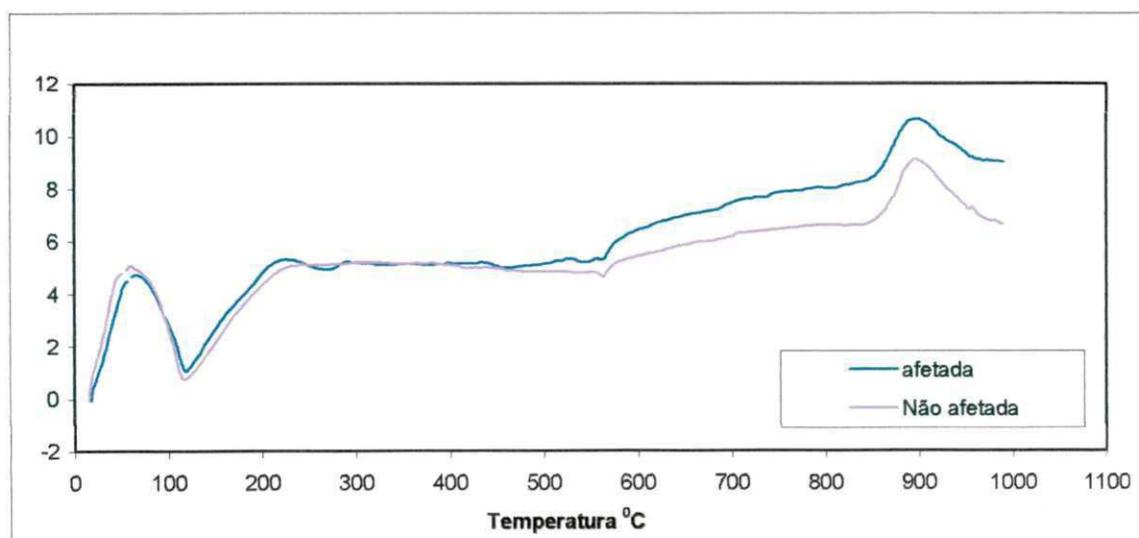


Figura 4.5 - Análise térmica diferencial dos pós dos tijolos afetados e não afetados pela umidade.

Analisando a Figura 4.5 podemos observar uma perda de água a aproximadamente a 110°C tanto na amostra afetada como na amostra não afetada pela umidade, a cerca de 573°C uma pequena variação que indica uma transformação do quartzo  $\alpha$  para quartzo  $\beta$ , e a 910°C temos uma nova variação no comportamento da curva. A esta temperatura ocorre a nucleação da mulita, como isto deveria ter ocorrido quando da queima do tijolo na olaria, pois a temperatura recomendada de queima do tijolo durante sua fabricação é superior a da nucleação da mulita, é possível concluir que os tijolos foram mal queimados.

### 4.2.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A Figura 4.6 é o resultado de duas análises termogravimétricas, uma afetada pela umidade e outra não afetada pela umidade.

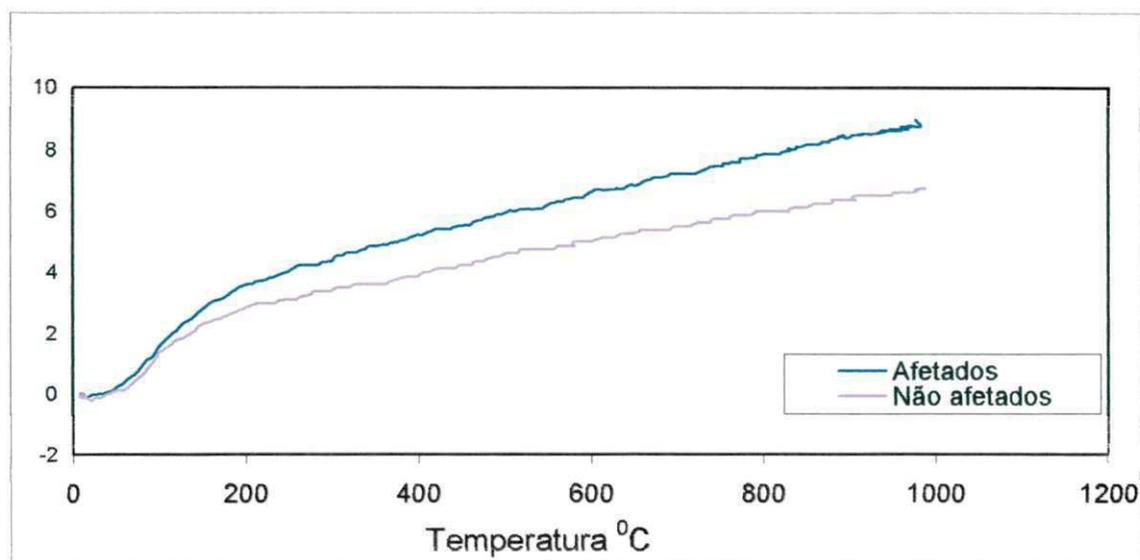


Figura 4.6 - Análise termogravimétrica dos pós do tijolos afetados e não afetados.

A amostra afetada teve uma maior perda de massa, na ordem de 8,4%, enquanto a amostra não afetada teve uma perda de massa de 6,3%. Isto é um indicativo da maior quantidade de água presente na amostra afetada.

### 4.2.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DA AMOSTRA AFETADA PELA UMIDADE

A Figura 4.7 apresenta a difração de raios-x da amostra afetada pela umidade, e a Figura 4.8 a difração de raio-x da amostra não afetada pela umidade.

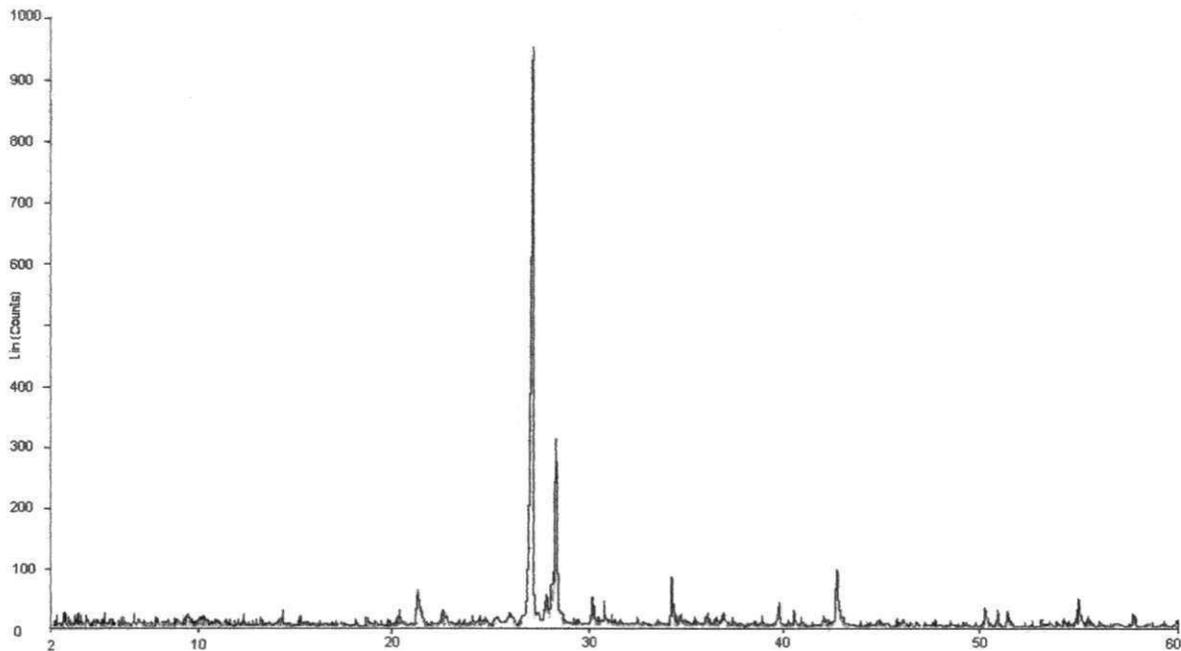


Figura 4.7 - Difratoograma de raios-x da amostra afetada.

Tabela 4.14 - Resultado da composição mineralógica pela difração de raios-x da amostra afetada.

Ângulo	Distancia interplanar (A0)	Intensidade (%)	Mineral
19,900	4,4580	1,40	Tridimita
20,898	4,2470	6,10	Quartzo
25,620	3,4740	1,80	Quartzo
26,666	3,3400	100	Quartzo
27,960	3,1880	32,2	Cristobalita
30,501	2,9284	4,00	Cristobalita
33,886	2,6432	7,00	Tridimita
36,537	2,4573	1,50	Quartzo
39,439	2,2829	2,60	Quartzo
40,286	2,2368	2,00	Quartzo
42,500	2,1253	6,80	Quartzo
50,128	1,8183	2,60	Quartzo
54,932	1,6701	4,60	Quartzo
57,782	1,5943	1,00	Quartzo

## Difração de raios-x da amostra não afetada pela umidade

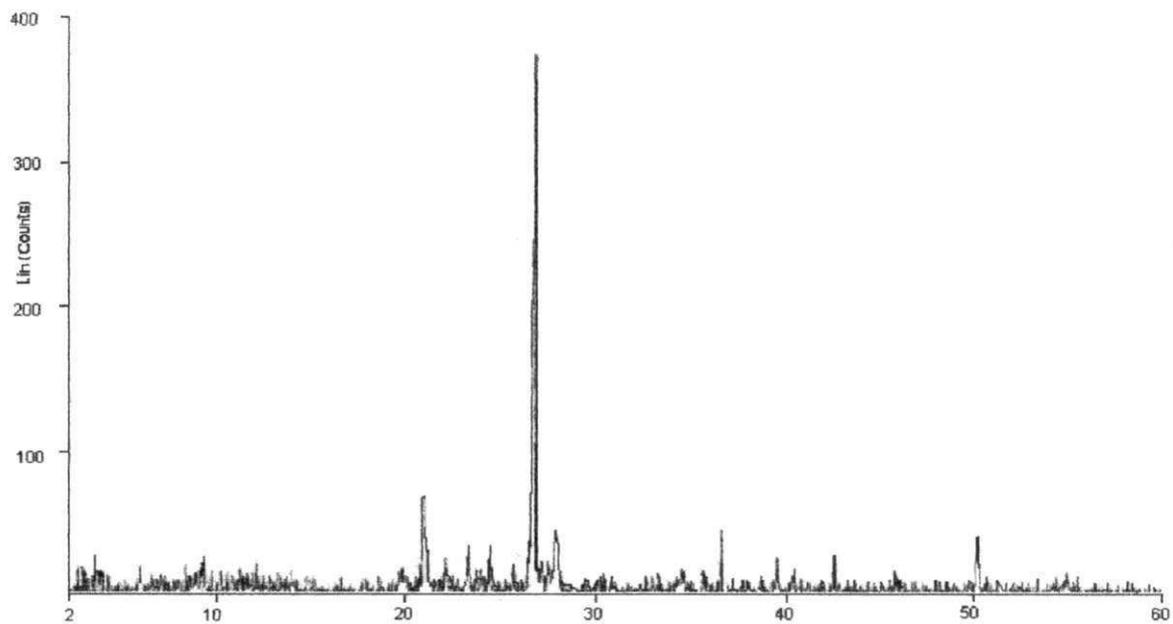


Figura 4.8 - Difratoograma de raios-x da amostra não afetada.

Tabela 4.15 - Resultado da composição mineralógica pela difração de raios-X da amostra não afetada.

Ângulo	Distância interplanar (Å)	Intensidade (%)	Mineral
19,796	4,4810	2,40	Tridimita
20,957	4,2350	17,8	Quartzo
22,055	4,0270	6,90	Cristobalita
23,263	3,8210	8,60	Tridimita
26,696	3,3370	100	Quartzo
27,909	3,1940	11,2	Cristobalita
35,726	2,5112	2,80	Tridimita
36,585	2,4542	11,5	Quartzo
39,500	2,2795	6,80	Quartzo
42,532	2,1238	7,30	Quartzo
45,751	1,9815	2,40	Quartzo
50,221	1,8151	10,8	Quartzo

A análise dos resultados obtidos com as duas amostras mostra que praticamente não há diferenças significativas em termos de composição mineralógica, os picos mais intensos corresponderam a somente três tipos de minerais, a cristobalita, a tridimita e o quartzo que foi mineral mais encontrado. Durante a operação de serragem foi observado que a quantidade de quartzo era muito grande de forma a serem encontrados grãos de até 4mm de diâmetro e que podem influenciar diretamente na resistência mecânica dos tijolos.

### 4.3 TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO

Serão analisados os resultados dos ensaios de tensão de ruptura a flexão em todos os corpos de prova que foram submetidos aos ensaios por medição direta.

A Figura 4.9 apresenta os resultados da tensão de ruptura a flexão

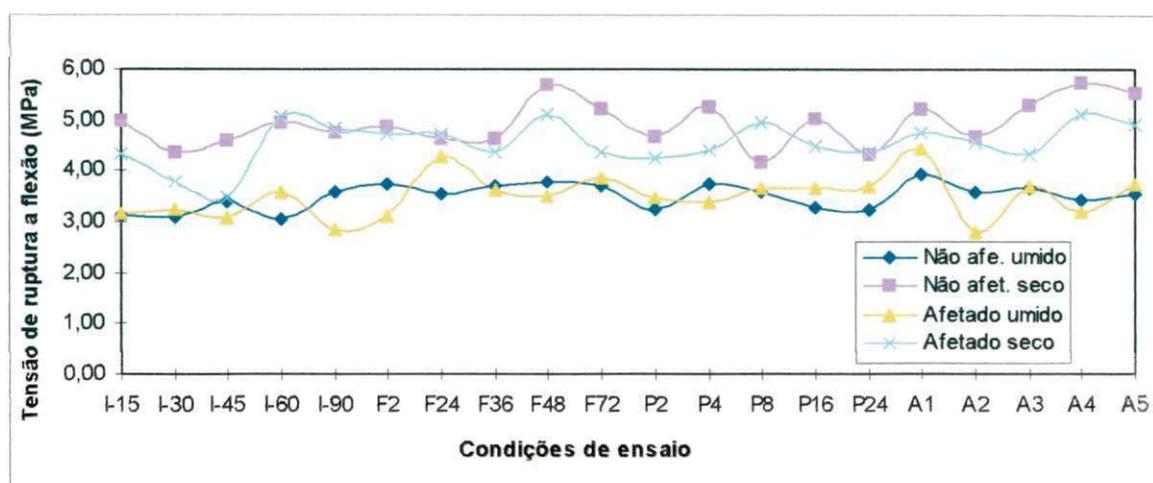


Figura 4.9 - Tensões de ruptura a flexão nos corpos de prova submetidos aos ensaios de EPU por medição direta.

Para todos os corpos de prova não afetados e úmidos é possível observar uma certa regularidade nos valores das tensões de ruptura, e quanto ao aumento da severidade do ensaio, não houve a diminuição da resistência mecânica à flexão.

Na Tabela 4.16 estão apresentados os valores da tensão de ruptura à flexão, mostrado na Figura 4.9, como também, a condição de ensaio a qual os corpos de prova originais foram submetidos logo após terem sido serrados.

Tabela 4.16 - Valores da tensão de ruptura a flexão média em MPa em diversas condições de ensaio.

Condições de ensaio	Não afetado úmido	Não afetado seco	Afetado úmido	Afetado Seco
original	2,96	4,44	2,78	4,08
I-15	3,10	5,00	3,14	4,31
I-30	3,06	4,38	3,24	3,79
I-45	3,39	4,60	3,06	3,45
I-60	3,05	4,95	3,58	5,08
I-90	3,58	4,76	2,85	4,82
F2	3,75	4,88	3,11	4,71
F24	3,56	4,63	4,30	4,72
F36	3,71	4,65	3,64	4,36
F48	3,76	5,69	3,51	5,10
F72	3,72	5,23	3,84	4,36
P2	3,24	4,66	3,46	4,26
P4	3,73	5,27	3,38	4,41
P8	3,59	4,15	3,68	4,93
P16	3,29	5,02	3,67	4,50
P24	3,26	4,31	3,70	4,35
A1	3,95	5,24	4,45	4,76
A2	3,57	4,68	2,82	4,56
A3	3,65	5,30	3,71	4,34
A4	3,42	5,71	3,20	5,10
A5	3,55	5,55	3,73	4,90

Os valores das tensões de ruptura nos corpos de prova original é inferior a todos os outros valores, comprovando que a umidade influenciou no comportamento mecânico dos tijolos, tanto afetados como não afetados pela umidade. Também não há, no geral, diferenças entre os tipos de tratamentos, e nem no tempo a que foram submetidos os corpos de prova.

Com o aumento da severidade do ensaio não ocorreu uma redução gradual da resistência mecânica como era esperado, isto pode ter ocorrido porque os tijolos durante todo o tempo útil na edificação sofreram as mais variadas condições ambientais. Outra causa pode ser o tratamento térmico a que foram submetidos os corpos de prova serrados.

Comparando os resultados de tensão de ruptura à flexão e resistência à compressão realizados pelo Eng. Romilde Almeida de Oliveira (em anexo no relatório final sobre o desabamento do Edifício Aquarela), é possível observar uma mesma tendência nos resultados, pois em tijolos afetados a resistência à compressão e a resistência à flexão são inferiores às resistências quando os tijolos não são afetados pela umidade.

## **5 - CONCLUSÕES**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões parciais referentes ao ensaio de expansão por umidade, caracterização mineralógica, ensaios químicos e tensão de ruptura à flexão. A seguir será apresentada uma conclusão final, na qual estão confrontados os objetivos desta pesquisa e os resultados alcançados.

### **5.2 CONCLUSÕES PARCIAIS**

#### **5.2.1 EXPANSÃO POR UMIDADE**

Os resultados das expansões por umidade total na maioria dos corpos de prova dos ensaios de imersão, fervura e panela de pressão, mostram que estas EPU's não são maiores que a EPU atual dos tijolos. Desse modo os tijolos do edifício Aquarela já estavam com um alto grau de expansão, o que pode ter causado a queda da resistência mecânica e conseqüentemente o colapso da estrutura.

A EPU futura negativa resulta dos cálculos feitos em relação ao comprimento inicial. Então após o tratamento térmico e ensaios de expansão, a EPU total não é suficiente para gerar uma expansão maior que a EPU inicial. Isto ocorreu na maioria dos corpos de prova submetidos ao autoclave(1h e 2h de tratamento), à fervura, à imersão e à panela de pressão. Pode-se observar uma expansão por umidade futura coerente no tratamento em autoclave a partir das 3h de tratamento.

De fato, quando o resultado do ensaio da EPU futura for negativo, é possível considerar este valor como sendo nulo, pois o tratamento ao qual foi submetido não foi suficiente para que o corpo de prova expanda o suficiente.

---

Praticamente todos os corpos de prova apresentaram pequenas fissuras após os tratamentos de expansão, então todos os resultados terão que ser vistos com muito cuidado. Como por exemplo, o caso dos corpos de prova ficarem menores do que seu tamanho original após o tratamento, isto aconteceu devido à desagregação do corpo de prova, mas também pode ser devido uma imprecisão do aparato medidor, bem como do manuseio deste equipamento.

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 0,4mm de espessura até 0,9mm 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.

#### **5.2.1.1 IMERSÃO**

Os ensaios de imersão realizados nos tempos de 15, 30, 45, 60 e 90 dias mostram que não houve diferenças entre as expansões nos diversos tempos, devido ao alto grau de expansão que os corpos de prova já sofreram. Neste tratamento tivemos uma expansão média de 0,8mm/m, o que já é superior ao limitado pela norma (0,3mm/m).

#### **5.2.1.2 FERVURA**

Os ensaios de fervura realizados nos tempos de 2, 24, 36, 48 e 72 horas mostram que entre os corpos de prova do próprio grupo entre os não afetados e do grupo dos afetados há grandes diferenças de expansão por umidade, e que as expansões são praticamente iguais até as primeiras 12h de tratamento. Após este tempo os corpos de prova afetados pela umidade têm uma maior expansão que os não afetados o que informa que houve uma maior ré-hidratação destes corpos de prova. A partir das 24h de tratamento há uma queda das dimensões dos corpos, devido à desagregação dos grãos dos corpos de prova que quando medidos novamente apresentaram-se menores.

---

Após as 24h de tratamento até o final os corpos de prova afetados tem uma maior desagregação, pois estavam submetidos a um meio mais agressivo quando ainda compoendo a alvenaria estrutural do edifício que os corpos de prova não afetados pela umidade, assim tem uma resistência menor ao desgaste. A EPU média nas primeiras 24h de tratamento foi de 1,0mm/m, superior ao normalizado (EPU de 0,3mm/m).

### **5.2.1.3 *PANELA DE PRESSÃO***

Os ensaios realizados na panela de pressão nos tempos de 2, 4, 8, 16, 24 horas mostram que determinados corpos de prova diminuíram de comprimento, isto pode estar ligado ao fato que em todo o ensaio, constatou-se grande quantidade de pó desprendido dos corpos de prova, isto é, houve uma grande deterioração dos tijolos. Ainda neste ensaio, que não é normalizado, as expansões dos corpos de prova afetados e não afetados são praticamente iguais, com expansão ligeiramente superior para os corpos de prova afetados até 12h de tratamento. A partir de aproximadamente 16h de tratamento os corpos de prova afetados e não afetados começam a desagregar, mais fortemente os corpos de prova afetados, isso explica a causa porque o gráfico tem a declinação no final.

### **5.2.1.4 *AUTOCLAVE***

Os ensaios realizados no autoclave nos tempos de 1, 2, 3, 4, 5 e 10 horas foram os ensaios de maior EPU, chegando a duplicar o valor da expansão. Os corpos de prova afetados obtiveram maior expansão em todo o tratamento do que os corpos de prova não afetados

Não houve diferença significativa entre a expansão sofrida com o tempo de 1h e com os outros tempos de tratamento, inclusive com o tempo de 10 horas, que foi um ensaio não planejado, mas que serviu para esta comparação de expansão. Foi o único ensaio que apresentou uma EPU futura significativa. A expansão média às 5h de tratamento ficou em aproximadamente 1,9mm/m, a mesma expansão para o ensaio há 10h de tratamento.

### 5.2.1.5 DILATOMETRIA

Os ensaios realizados no dilatômetro nos corpos de prova da imersão, fervura, panela de pressão, autoclave e corpos de prova que não foram submetidos aos ensaios de EPU demonstram que as expansões que ocorreram no dilatômetro são EPU totais e quando comparadas as EPU da medição direta os resultados não são os mesmos e às vezes até divergem quanto as EPU.

Apesar dos corpos de prova não serem regulares variando as suas dimensões em alguns milímetros, na largura, espessura e comprimento, pode-se concluir para os corpos de prova naturais e autoclavados do grupo 1:

- a amostra de tijolos afetados apresentou EPU atual de aproximadamente 100% maior que a amostra de tijolos não afetados;
- as amostras de tijolos afetados e não afetados apresentaram EPU total bastante similar;
- a amostra de tijolos afetados apresentou EPU futura, de aproximadamente 80% maior que a amostra de tijolos não afetados;
- as expansões por umidade (atual, total e futura) apresentadas pelas amostras de tijolos afetados e tijolos não afetados foram bastante superiores ao limite aceitável para tijolos cerâmicos (0,3mm/m).

Os resultados das dilatometrias do grupo 2, são bastantes controversos devido as condições dos corpos de prova que foram serrados após os ensaios de EPU e tensão de ruptura a flexão. Verifica-se praticamente a mesma expansão nos corpos de prova. Comprova-se também que com o aumento da severidade dos ensaios ocorreu uma maior expansão tanto nos tijolos afetados como nos tijolos não afetados.

---

## **5.2.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

### **5.2.2.1 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL CONSTITUINTE DO TIJOLO**

Os compostos químicos dos tijolos afetados e tijolos não afetados são os mesmos e não influenciaram nas diferenças de expansão ocorrida, e nem na resistência mecânica. Nos resultados do ITEP (Instituto tecnológico do Estado de Pernambuco) os resultados também concordam.

### **5.2.2.2 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL**

Houve uma perda de água a aproximadamente 110°C, tanto na amostra afetada como na amostra não afetada pela umidade. A cerca de 573°C uma pequena variação que indica uma transformação do quartzo  $\alpha$  para quartzo  $\beta$ , e a 910°C temos a transformação da mulita. Neste ensaio as diferenças entre afetado e não afetado não são significantes, assim não fornece subsídios para alguma conclusão concreta.

### **5.2.2.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA**

A amostra afetada teve uma maior perda de massa, na ordem de 8,4%, enquanto a amostra não afetada apresenta uma perda de massa de 6,3%. Isto é um indicativo da maior porosidade do que a amostra afetada.

### **5.2.2.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X**

Os resultados das duas amostras mostram que praticamente não há diferenças significativas como era de se esperar, em termos de composição mineralógica, os picos mais intensos corresponderam a somente três tipos de minerais o quartzo que foi o mineral mais encontrado, a cristobalita e tridimita.

### **5.2.3 TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO**

Com a requeima dos corpos de prova utilizados na medição direta, a 500°C ocorreu um ganho de resistência mecânica devido à saída d'água do material, resultando na diminuição nas diferenças de resistência mecânica entre corpos de prova não afetados e afetados pela umidade, como também os ensaios de EPU não obtiveram nenhuma influência na resistência mecânica nos corpos de prova com o aumento da severidade dos ensaios.

As amostras dos tijolos afetados apresentaram uma resistência à compressão inferior as amostras de tijolos não afetados pela umidade para os corpos de prova ensaiados pelos institutos de pesquisa, conforme Laudo técnico do Edifício Aquarela, na época do desabamento. Uma diminuição de resistência só foi verificada com o ensaio de resistência mecânica a flexão nos corpos de prova originais.

Uma das causas das discrepâncias entre as cargas de ruptura verificada nos corpos de prova dos tijolos pode ser devido às fissuras existentes na maioria dos corpos de prova.

### **5.3 CONCLUSÃO FINAL**

Foram estudados os tijolos, o solo e a água do lençol freático do Edifício Aquarela que desabou em 1997. Através do estudo da expansão por umidade seguida da avaliação da resistência mecânica à flexão, foram obtidos subsídios para comprovar que a expansão por umidade juntamente com erros de execução da obra foi uma das causas principais que contribuíram para o colapso da edificação. Os resultados permitem concluir que houve uma perda de resistência mecânica devido a EPU sofrida pelos tijolos, que por sua vez tinham uma péssima qualidade comprovada por grandes irregularidades em suas dimensões e a transformação da mulita que ocorreu durante os experimentos indicando má sinterização.

## 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- i. Analisar as tensões de ruptura a flexão e EPU nos tijolos em outros sentidos, como no sentido perpendicular ao maior comprimento do tijolo.
  - ii. Realizar ensaios dilatométricos em corpos de prova submetidos à panela de pressão e imersão sem terem sido submetidos ao ensaio de tensão de ruptura a flexão.
  - iii. Analisar em olarias a expansão por umidade de tijolos recém saídos do forno.
  - iv. Fazer a correlação entre os resultados desta dissertação com outros resultados de EPU em edifícios que também ruíram na cidade do Recife.
  - v. Realizar ensaios de dilatometria em maior quantidade de corpos de prova.
  - vi. Analisar a EPU nos diversos eixos da peça, ou seja, a EPU volumétrica.
  - vii. Estudos sobre a porosidade, absorção d'água e área específica dos tijolos afetados e não afetados.
  - viii. Deve-se mencionar que ainda existe necessidade de pesquisas fundamentais em diversas áreas, incluindo estudos detalhados das relações entre a composição mineralógica, cinética da expansão por umidade e transformações de fase que ocorrem com tratamento térmico.
-

## 7 - BIBLIOGRAFIA

- **ABNT, Ensaios para Certificação de Revestimentos Cerâmicos - Determinação da carga de ruptura;** Centro Cerâmico do Brasil, NBR-13818, 1999.
  - **ASTM, Methods of Sampling and Testing Clay Building Bricks, Method for Determining Characteristic Expansion,** 1226.5, 1994.
  - **ASTM, Standart Test Method for Moisture Expansion of Fired Whiteware Products C 370-88,** 1994.
  - **ASTM. Standart Test Methods of Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, C67-92a,** USA, 1992.
  - **BAUMGARTNER, J.B; FERREIRA, H.C. A Insuficiência dos Ensaios de Choque Térmico e Autoclavagem para Caracterizar o Fendilhamento do Vidrado de Azulejos Após Fixação.** 1980. Cerâmica, v.26, n° 130, p.263.
  - **BERNETT, F.E. Effects of Moisture Expansion of Installed Quarry Tile.** Ceram. Soc.Bull. 1976. v. 55, n° 12, p.1039-1042.
  - **BOWMAN, R. An analysis of some ceramic floor Tiling Failures,** Key Engineering Materials, 1991, v. 53-55, p.173-178.
  - \_\_\_\_\_ **Melhorando a precisão das determinações da Expansão por Umidade,** Cerâmica Industrial, São Paulo, v.1, p.25-29, ago./dez. 1996.
  - \_\_\_\_\_ **The Need For Determining The Relevant Moisture Expansion of a Brick,** J Austr. Ceram. Soc., 1985, vol 21, n° 1, p.13-15.
-

- \_\_\_\_\_ **The Need for Establishing a Moisture Expansion Convention for the Analysing of Tiling Systems Failures** , Proc. 2nd World Congr. on Ceram. tile Quality, Castellon, p.459, 1992.
  - BOWMAN, R; WESTGATE, P. **Moisture Expansion Kinetcs As A Function Of Conditioning**, p.1-6, 1999.
  - BULLIN, L; GREEN, K. **Crazing of Wall Tiles**, Trans. Brit. Ceram. Soc., 1954, v. 53, p.39-66.
  - CAMPOS, L.F.A. **Estudo da Expansão por Umidade em Cerâmica Vermelha**,
  - CHIARI, L. et al. **Expansão por Umidade: Parte I, O Fenômeno. Cerâmica Industrial**, São Paulo, v.1, n.1, p. 6-13, mar./abr.1996
  - CHIARI, L. et al. **Expansão por Umidade: Parte II. Efeito da Adição de Calcita, Cerâmica Industrial**, São Paulo, v.1, p. 35-37, jul./ago.1996.
  - COLE, W.F. **A Note on Residual Moisture Expansion of Bricks**, J. Aust. Ceram. Soc., 1986, v. 22, n° 1, p.55-58.
  - \_\_\_\_\_ **Moisture Expansion of a Ceramic Body and Its Internal Surface Area**, Nature, 1962, v. 196, n° 4850, p.127-128.
  - \_\_\_\_\_ **Moisture Expansion Relationships for a Fired Kaolinite-Hydrous Mica Quartz Clay**, Nature, 1961, v. 192, n° 4804, p.737-739.
  - \_\_\_\_\_ **Moisture-expansion Characteristics of a Fired Kaolinite-hydrous Mica quartz Clay**. J Amer. Ceram. Soc., 1962, v. 45, n° 9, p.428-434.
  - \_\_\_\_\_ **On The Prediction of Long-term Natural Expansion of Fired Clay Bricks**, J. Aust. Ceram. Soc., 1988, v. 24, n° 1, p. 81-88.
  - \_\_\_\_\_ **The Contribution of CSIRO to the Study of the Moisture Expansion of Bricks**, J. Aust. Ceram. Soc., 1986, v. 22, n° 1, p.45-54.
-

- COLE, W.F; BANDS, P.J. **Studies on the Moisture Expansion of Monocottura Floor Tiles of Australian Manufacture**, Key Engineering Materials. 1991, vols 53-55, p.185-190.
  - COLE, W.F; BIRTWISTLE, R. B. **Kinetics of Moisture Expansion of Ceramic Bodies**, J. Amer. Ceram. Soc., 1969, v. 48, n° 12, p.1128-1132.
  - CROOK, D.N. **A Study of Fired Kaolinite-muscovite-quartz Bodies: I - Moisture Expansion, Pore Structure and Thermal Expansion**, J. Aust. Ceram. Soc., 1982. v.18, n° 1, p.10-14.
  - CROOK, D.N; CLARKE, L.N; DONALDSON, R.J. **A Study of Fired Kaolinite-muscovite quartz Bodies: II- Scanning Electron Microscope Examination, Acoustic Emission and Moisture Expansion**, J. Austr. Ceram. Soc., 1984. v. 20, n° 1, p. 13-19.
  - CULLEN, G.V; KLUCIS, E.S; MCDOWELL, I. J. **Accelerated Moisture Expansion in Clay Brick**, J. Amer Ceram. Soc.,v.47, p.415, 1964.
  - DEMEDIUK, T; COLE, W.F. **Contribution to the Study of Moisture Expansion in Ceramic Materials**, J. Am. Ceram. Soc. 1960, v.43, n° 7, p.359.
  - DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **Projeto do Aquarela teve falhas**, Recife. 01 agosto, 1997.
  - ENRIQUE, J. et al. **Tecnica cerâmica**, 1990, n° 183, p.282.
  - FERREIRA, H. C e Machado, E.C.C. **Estudos sobre a resistência ao choque térmico e autoclavagem**, Relatório do CNPQ. 1974.
  - FERREIRA, H. C. **Estudos do Comportamento mecânico do Edifício Aquarela**, Jaboatão dos Guararapes, PE, Relatório técnico da Associação Técnica Luiz Fernando de Oliveira Lima, ATECEL. Campina Grande, Pb, agosto 1997.
  - FOSTER, D; THOMAS, A. **Aspects of Durability of Clay Brickwork**, Trans. J. of the British Ceramic Society, 1982. v. 81, n° 3, p. 59-61.
-

- GELLER, R.E; CREAMER, A.S. **Note on Moisture Expansion of Ceramic Whiteware in Storage and Service**, J. Amer. Ceram. Soc., 1941, v.24, p.77-79.
  - GOMES, C.M. **Estudo da Expansão por Umidade (EPU) em Materiais Cerâmicos**, Relatório de Iniciação Científica, CNPq/PIBIC, Fevereiro de 2000.
  - GRIMM, C.T. **Moisture Expansion in Brick Masonry**, Trans. J. Br. Ceram. Soc., 1983. n° 82, p.16-17.
  - HOLDRIDGE, D. A. **Some Aspects of Moisture Expansion of Ceramic Bodies**, Anais do Congresso Internacional de Cerâmica, Zurich, 1950, p. 191.
  - HOLSCHER, H.H. **Effects of Autoclave Treatments on Ceramic Bodies and Clays**, J. Am. Ceram. Soc. 1931, v.14, n° 3, p.207.
  - HOSKING, J. S; HUEBER, H.V. **Permanent Moisture Expansion of Clay Products on Autoclaving**, Nature, 1958, v.182, n° 4643, p.1142-1144.
  - HOSKING, J. S; HUEBER, H.V. **Permanent Moisture Expansion of Clay Products on Natural Exposure**, Nature, 1959, v. 184, n° 4696, p.1373-1375.
  - Internacional Standardization Organization - ISO 10545 -10; Ceramic tiles – Test Methods, 1995, **Determinação da expansão por umidade**, 45.
  - LIRA, C. et al. Efeitos da Composição e da Temperatura de Queima na Expansão por Umidade de Corpos Cerâmicos, **Cerâmica Industrial**. São Paulo, v.2, p. 27-30, jan./abr. 1997.
  - MATTYASOVSKY-ZSOLNAY, L. **II -Autoclave Test Results on Crazing of Sanitary Ware and Wall Tile**. J. Amer. Ceram. Soc., 1946, v.29, p.203-204.
  - MCBURNEY, W. **Masonry Cracking and Damage Caused by Moisture Expansion of Structured Clay Tile**, 1954. Proc. Am. Soc. Testing Matr., v.54, p.1219.
  - MCNEILLY, T. **Brick Expansion: Aspects of the Australian Experience**, J. Brith. Ceram. Soc., 1983, v.82, p.14-16.
-

- MELLOR, J.W. **The Crazing and Peeling Of Glazes**, Transactions of the Ceramic Society, Everglend, 1935. v. 34, N° 1, p.1-112.
  - MERRITT, G.E; PETERS, C.G. **Interferometer Measurements of the Thermal Dilation of Glazed Ware**, J. Amer. Ceram. Soc., 1926, v.9, n° 6, p.327-342.
  - MILLS, R.G. **The use of the autoclave in testing ceramic products for resistance to crazing**. J. AM. CERAM. SOC. 1930, v.13, n° 12, p.903.
  - OLIVEIRA, R.A. **Edifício Aquarela, Laudo Técnico, Relatório Final**, vol. 1 e 2, 1997.
  - PALMER, L.A. **Volume Changes in Brick Masonry Materials**, J. Amer Ceram. Soc., 1931, v.14, p. 541-561.
  - Relatório de Iniciação Científica, CNPq/PIBIC, Agosto de 1999.
  - RIBEIRO, I.J.C. **Os Sais Solúveis na Construção Civil**, Dissertação de Mestrado, DEC/CCT/UFPB, 1996.
  - RIGBY, G.R. **Changes in the Size of Tiles and Bricks on Treatment with Water**, Trans. Brit. Ceram. Soc., v. 33, p.527-532, 1934.
  - ROBINSON, G.C. **The Reversibility of Moisture Expansion**, Bull. Amer. Ceram. Soc., 1985. v. 64, n° 5, p.712-715.
  - SCHURECHT, H.G. **Methods for Testing Crazing of Glazes Caused by Increases in Size of Ceramic Bodies**, J. Amer. Ceram. Soc., 1928, v. 11, p.271-277.
  - SCHURECHT, H.G; POLE, G.R. **Effect of Water in Expanding Ceramic Bodies of Different Composition**, J. Amer. Ceram. Soc., 1929, v.12, p.596-604.
  - SCHURECHT, H.G; POLE, G.R. **Method of Measuring Strains Between Glazes and Ceramic Bodies**. J. Amer Ceram. Soc. 1930, v. 13, p.369-375.
  - SMITH, A.N. **Investigation on Moisture Expansion of Porous Ceramic Bodies**, Trans. Brit. Ceram. Soc. 1955. v. 54, n.5, p.300-318.
-

- SMITH, R.G. **Moisture Expansion of Structural Ceramics: IV - Expansion of Unrestrained Fletton Brickwork**, Trans.Brit. Ceram. Soc., 1974, v. 736, p.191-198.
  - SPURRIER, H. **Some Observations on Terra Cotta Physics**, J. Am. Ceram. Soc. 1927, v.10, n° 9, p.686.
  - THIEMECKE, H. **Notes on Moisture Expansion**. J. Amer. Ceram. Soc., 1944, v.27, p.355-358.
  - THIEMECKE, H. **Thermal and Moisture Expansion of Ball Clays and Bodies Fired To Different Temperatures**. J. Amer Ceram. Soc., 1943, v. 26, n° 6, p.173-179.
  - THIEMECKE, H. **Thermal and Moisture Expansion of Kaolins and Bodies Fired to Different Temperatures**. 1941, v.24, n° 2, p.69.
  - TREISCHEL, C.C. **Some Notes on Moisture Expansion Tests**, Ceramic Age, 1935. vol. 45, n° 2, p.46-48,
  - VAUGHAN, F; DINSDALE, A. **Moisture expansion**, Trans. Brit. Ceram. Soc. 1962, vol 61, N° 1, p 1-19.
  - VAUGHAN, F; DINSDALE, A., **Adsorption and Desorption of Moisture in Fired Ceramic Materials**, 1959. Nature 183, n. 4661, p.600.
  - VIEIRA, A.C et al. **Determinação experimental das tensões devido a expansão por umidade (epu) em revestimentos cerâmicos**, 1997, Cerâmica v. 43, n° 279 p.42.
  - WEST, H.W.H. **Moisture Expansion**, Trans. J. Br. Ceram. Soc., 1983, v.82, n° 14.
  - YOUNG, J.E; BROWNELL, W.E. **Moisture Expansion of Clay Products**, J. Am. Ceram. Soc. 1959, v. 42, p. 571.
  - ZSEMBERY, S; MCNEILLY, T. **The Moisture Expansion of Bricks and Walls**. Key Engineering Materials. 1991. v. 53-55, p.202-207
-

## 8 - ANEXOS

### 8.1 DILATOMETRIAS

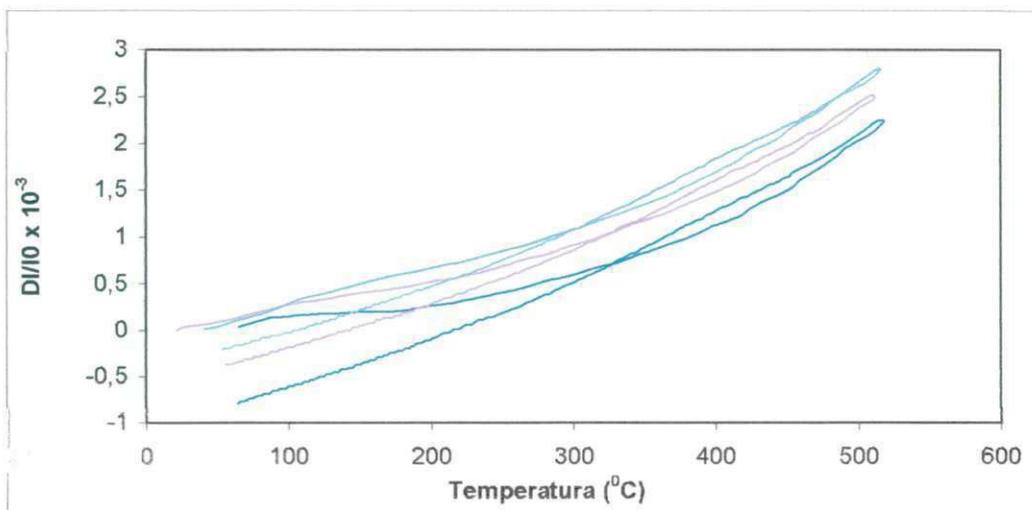


Figura A.1 - Dilatometria das amostras não afetados e naturais (grupo 1)

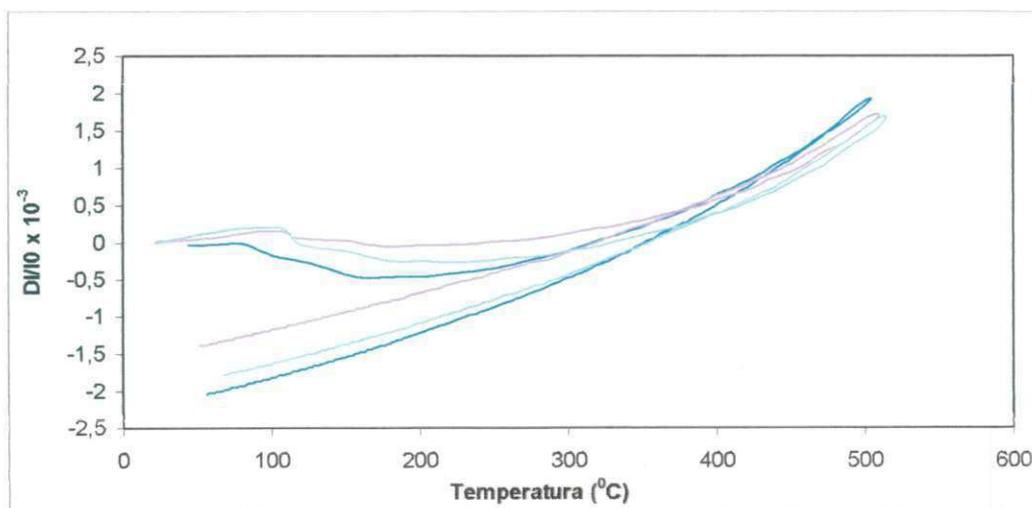


Figura A.2 - Dilatometria das amostras afetados e naturais (grupo 1)

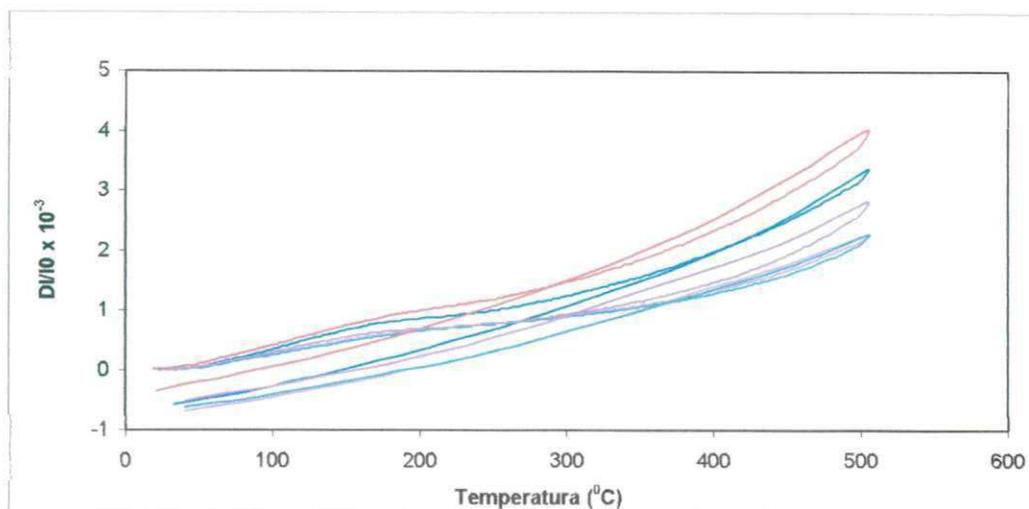


Figura A.3 - Dilatometria dos corpos de prova não afetados e fervura por 2h

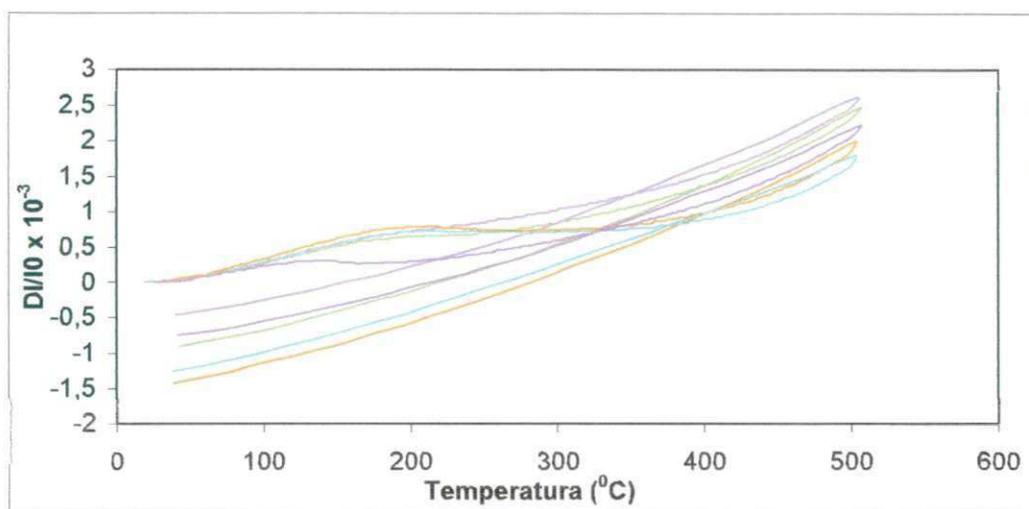


Figura A.4 - Dilatometria dos corpos de prova afetados e fervura por 2h

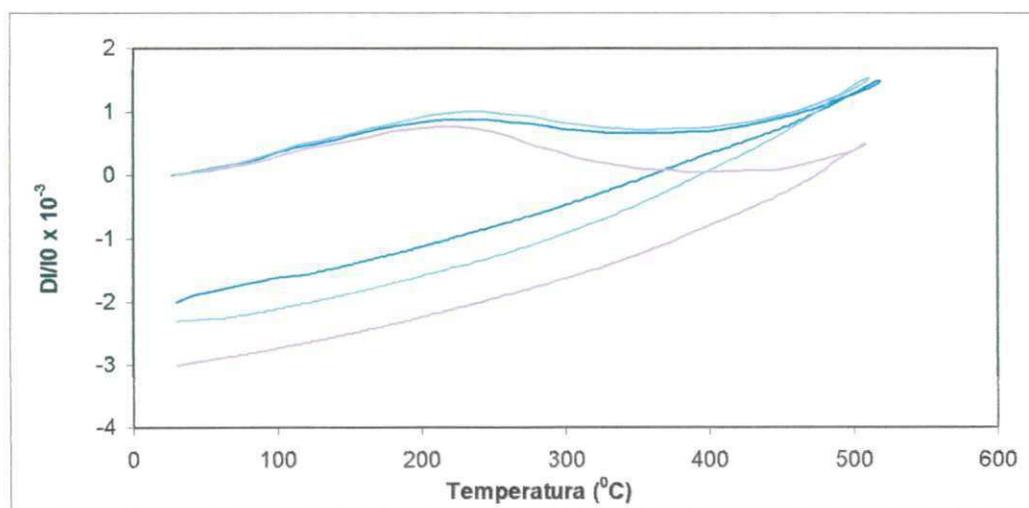


Figura A.5 - Dilatometria dos corpos de prova não afetados autoclavados por 5h

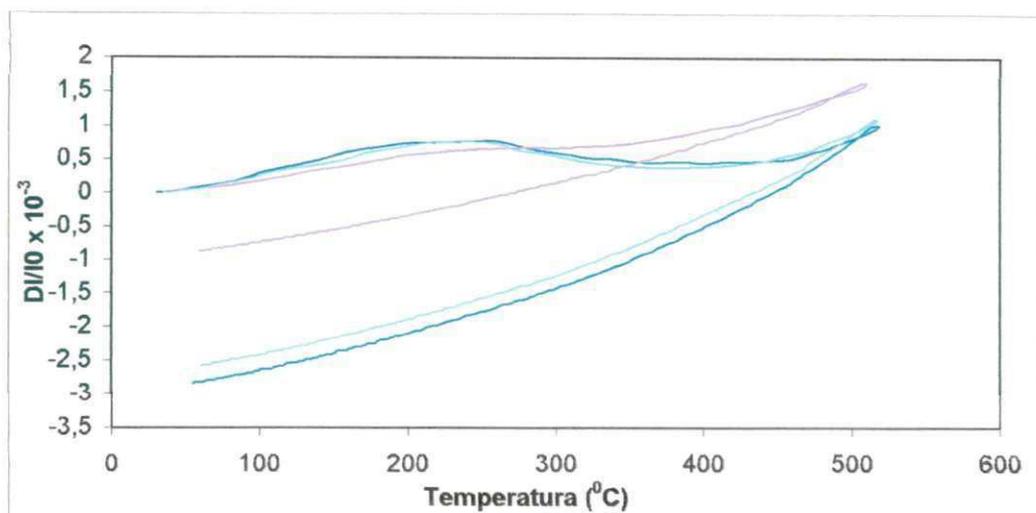


Figura A.6 - Dilatometria dos corpos de prova afetados e autoclavados por 5h

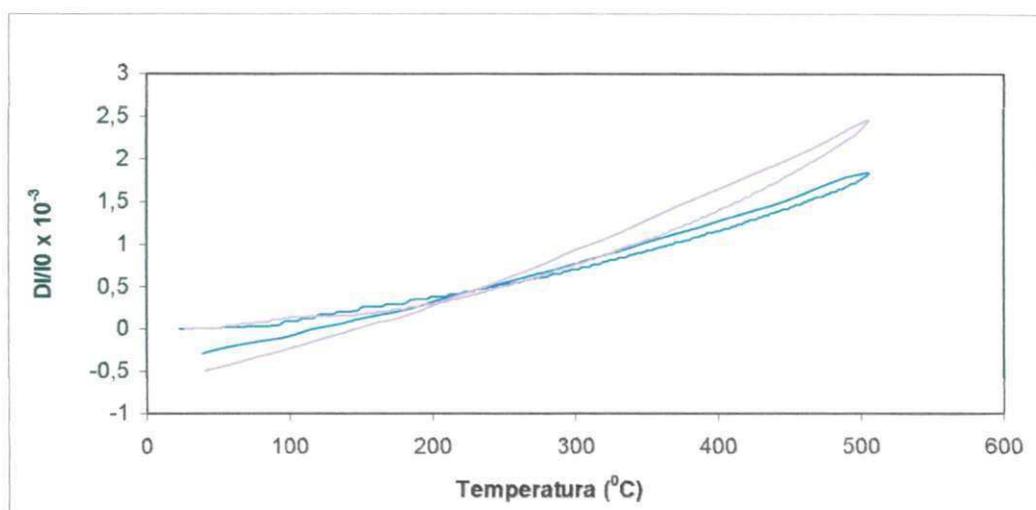


Figura A.7 - Dilatometrias dos corpos de prova não afetados pela umidade e imersos por 15 dias

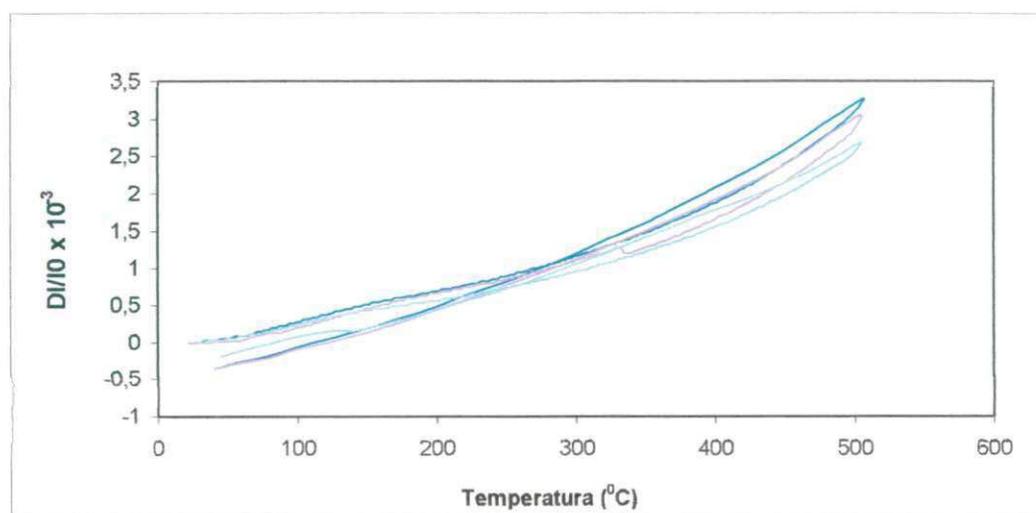


Figura A.8 - Dilatometrias dos corpos de prova afetados pela umidade e imersos por 15 dias

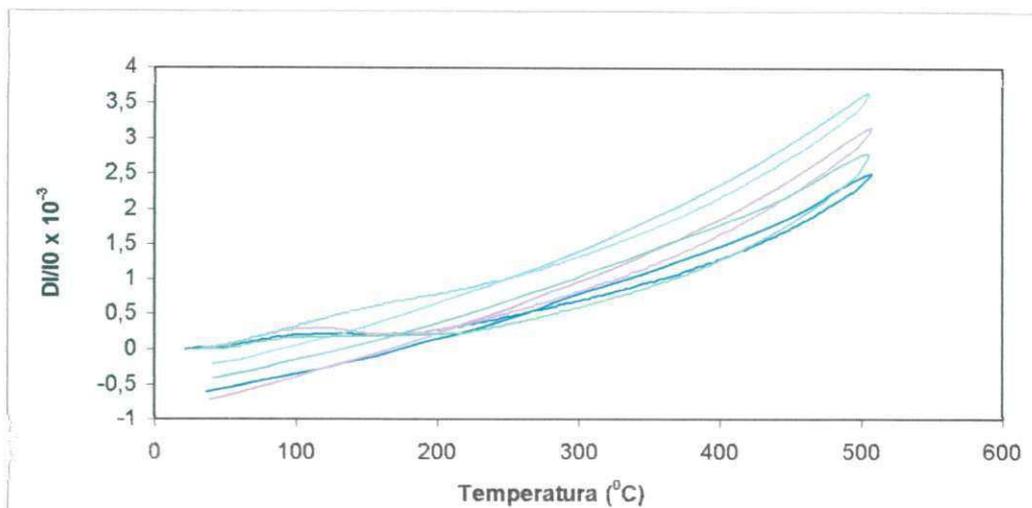


Figura A.9 - Dilatometrias dos corpos de prova não afetados pela umidade e imersos por 90 dias.

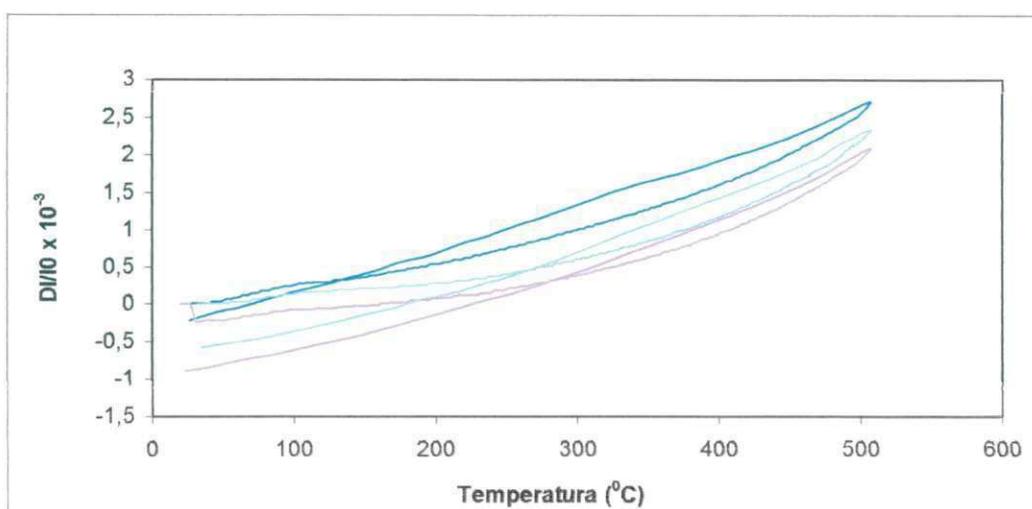


Figura A.10 - Dilatometrias dos corpos de prova afetados pela umidade e imersos por 90 dias

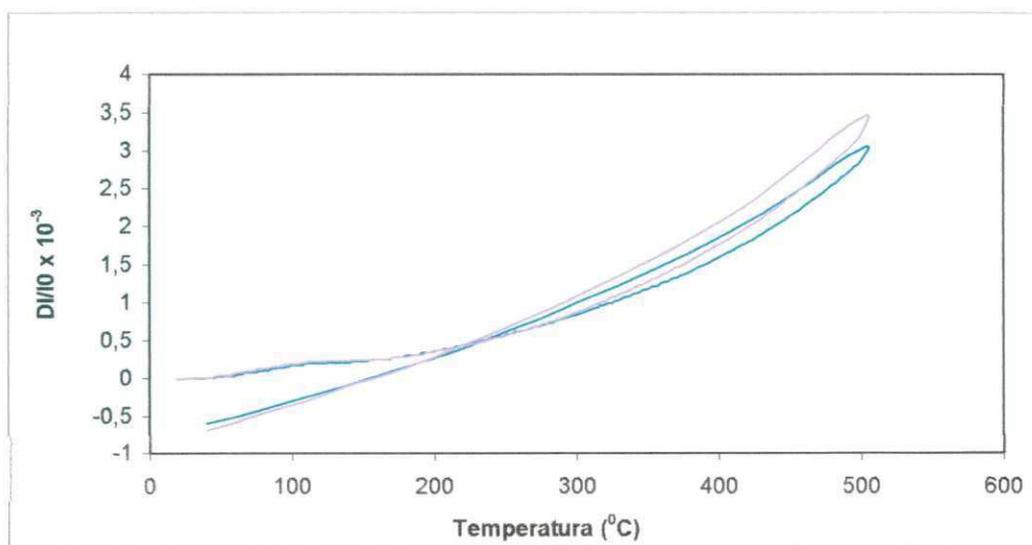


Figura A.11 - Dilatometria dos corpos de prova não afetados e fervura por 2h

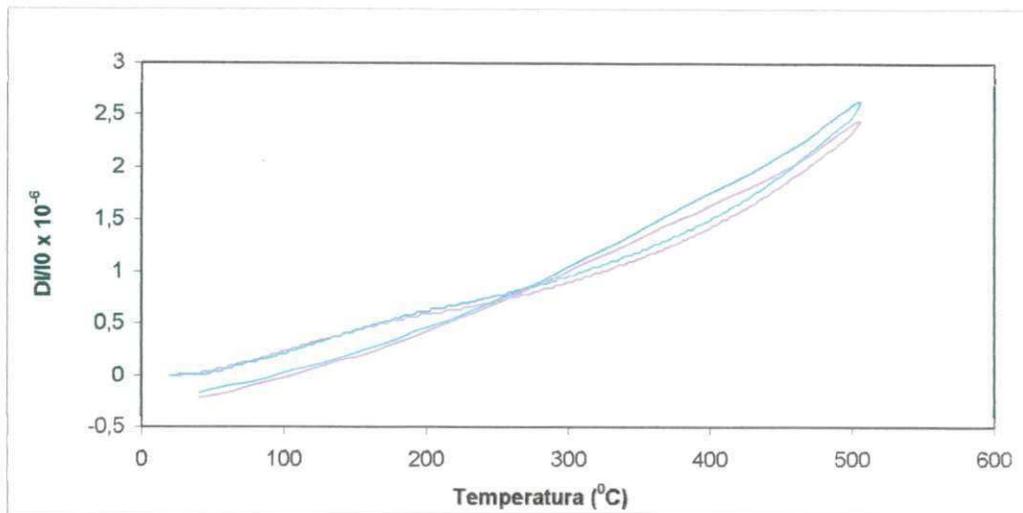


Figura A.12 Dilatometria dos corpos de prova afetados e fervura por 2h

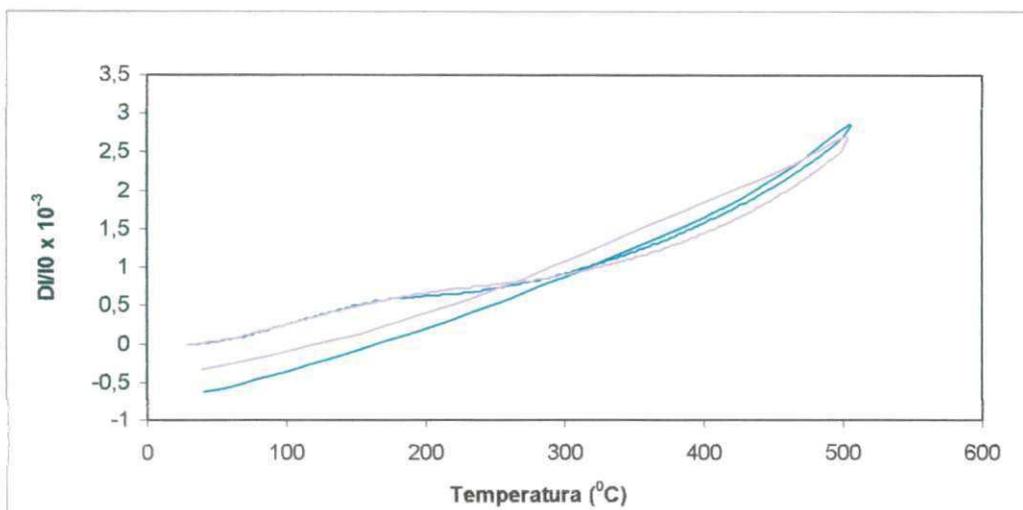


Figura A.13 - Dilatometria dos c.p. não afetados e fervura por 24h

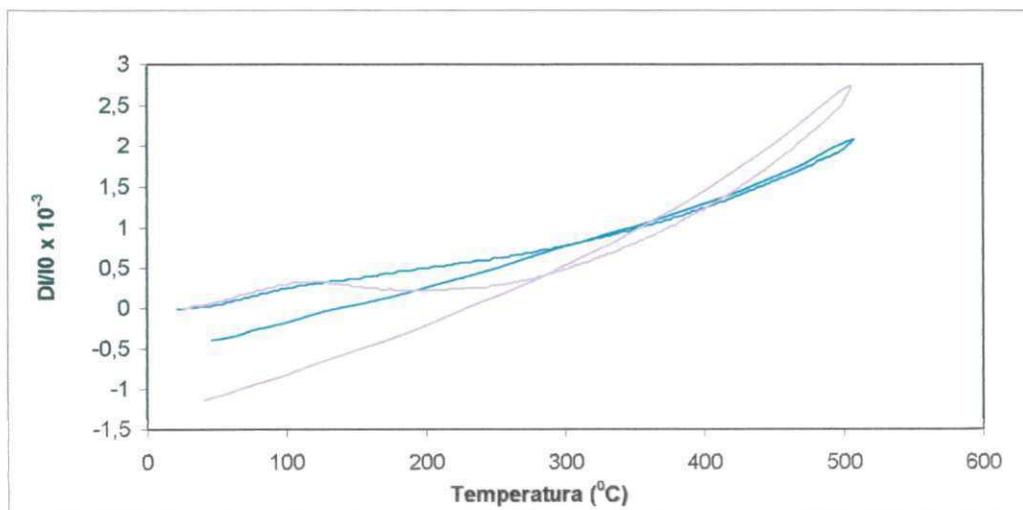


Figura A.14 - Dilatometria dos corpos de prova afetados e fervura por 24h

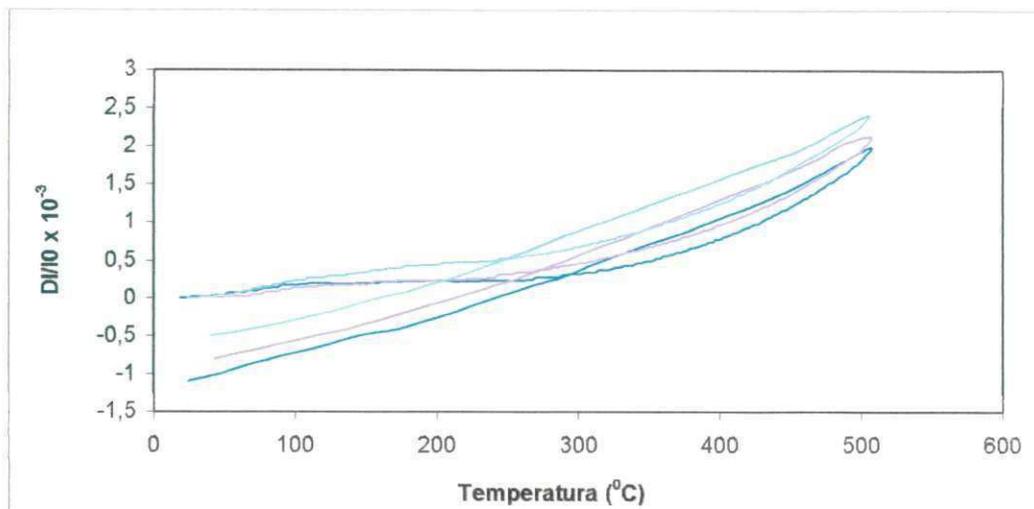


Figura A.15- Dilatometria dos corpos de prova não afetados e fervura por 72h

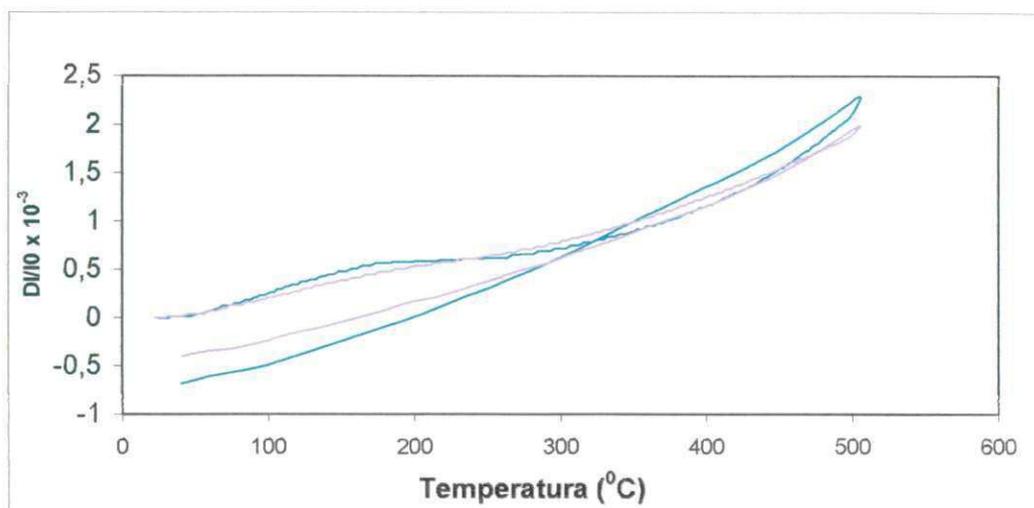


Figura A.16 - Dilatometria dos corpos de prova afetados e fervura por 72h

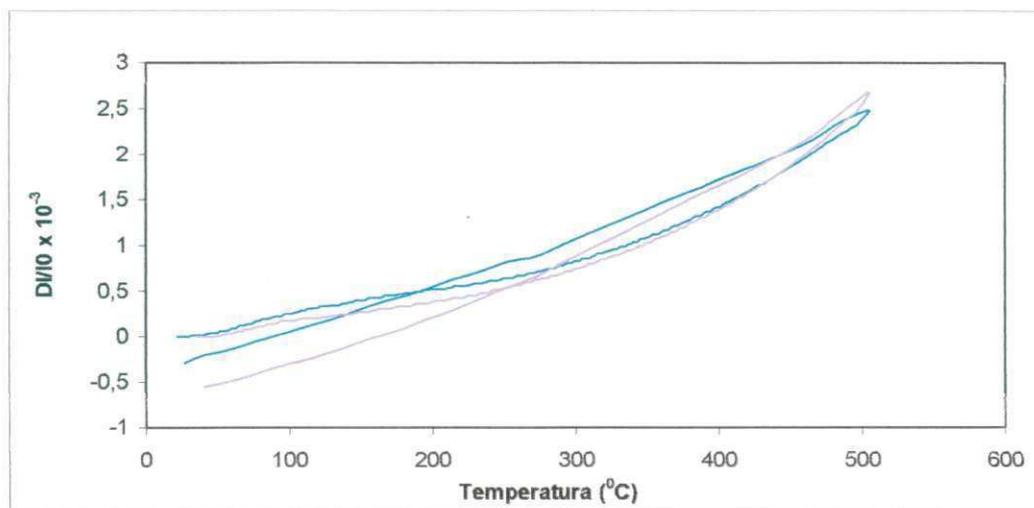


Figura A.17 - Dilatometria dos corpos de prova não afetados e panela de pressão por 2h

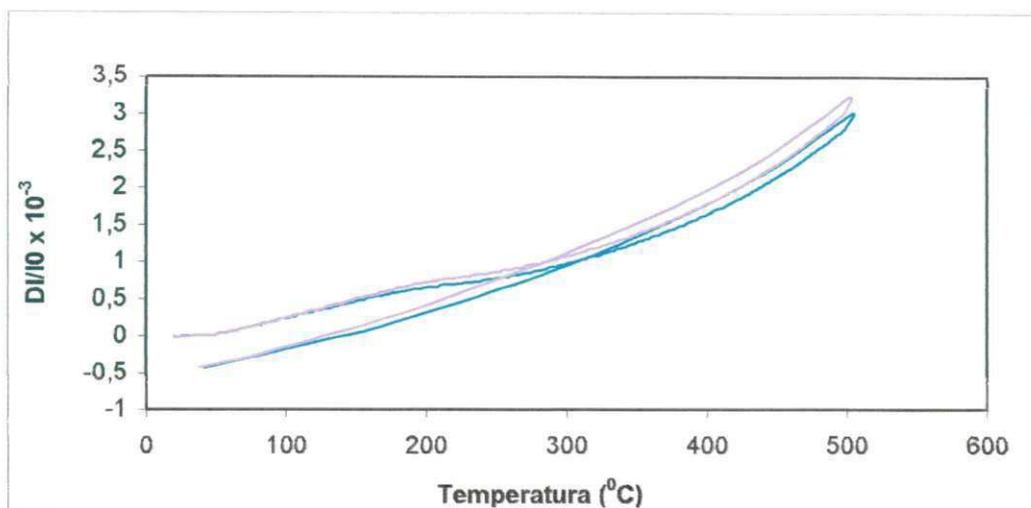


Figura A.18 - Dilatometria dos corpos de prova afetados e placa de pressão por 2h

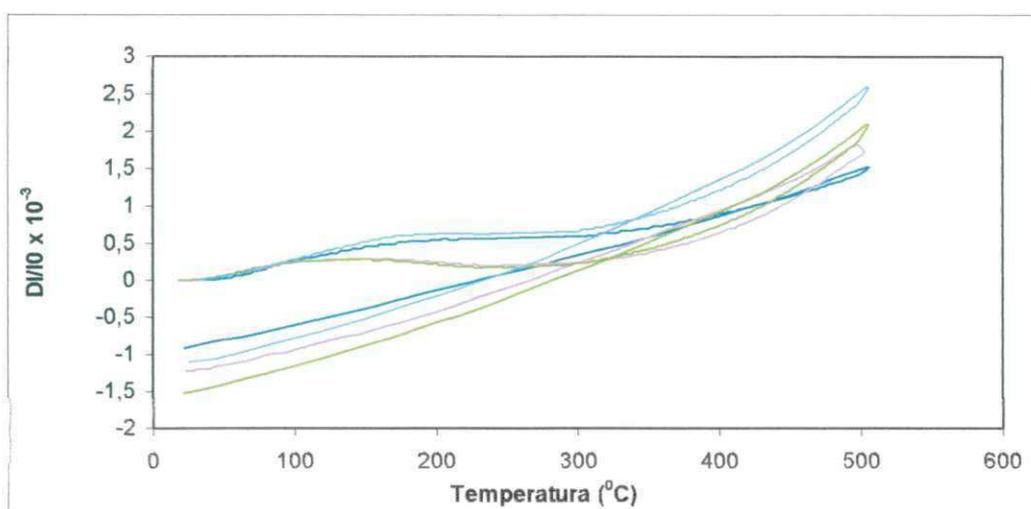


Figura A.19 - Dilatometria dos corpos de prova não afetados e placa de pressão por 24h

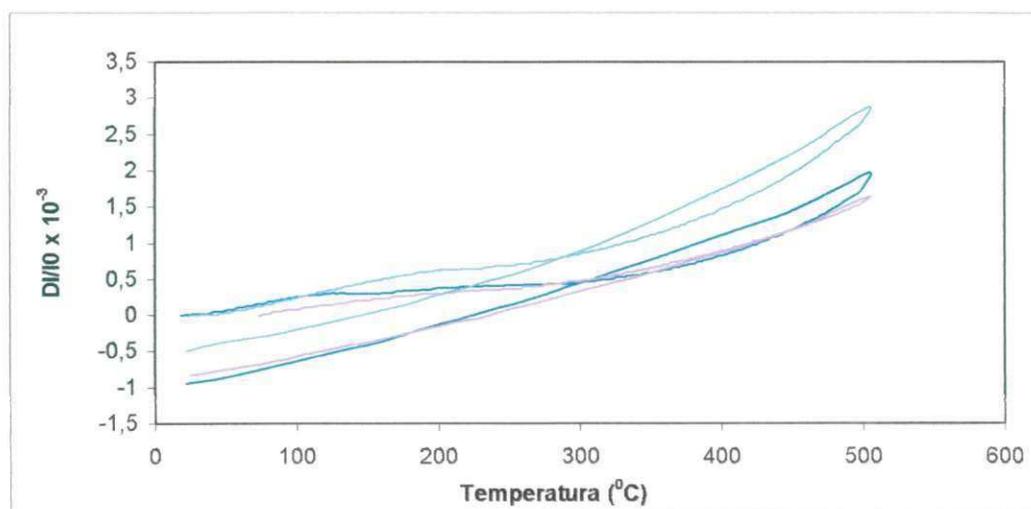


Figura A.20 - Dilatometria dos corpos de prova afetados e placa de pressão por 24h

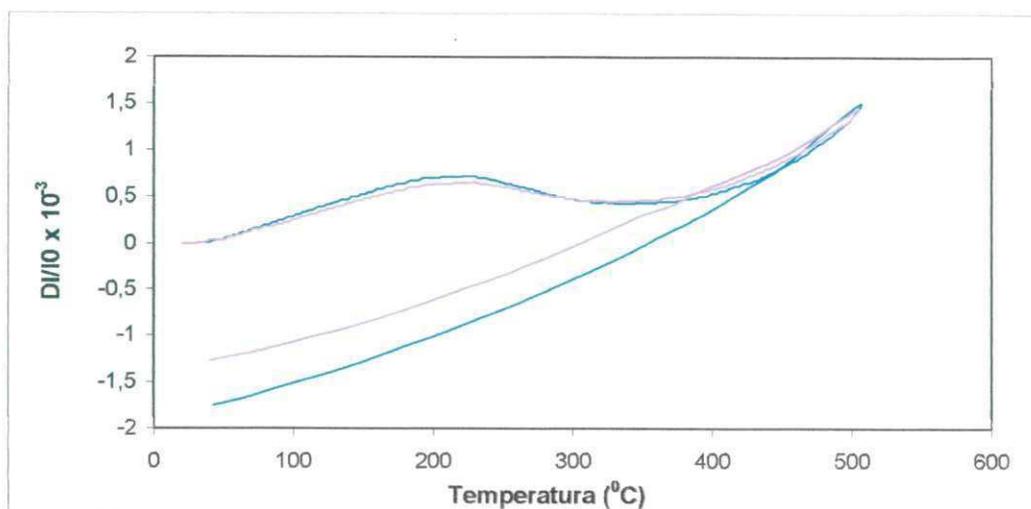


Figura A.21 - Dilatometria dos corpos de prova afetados autoclavados por 1h

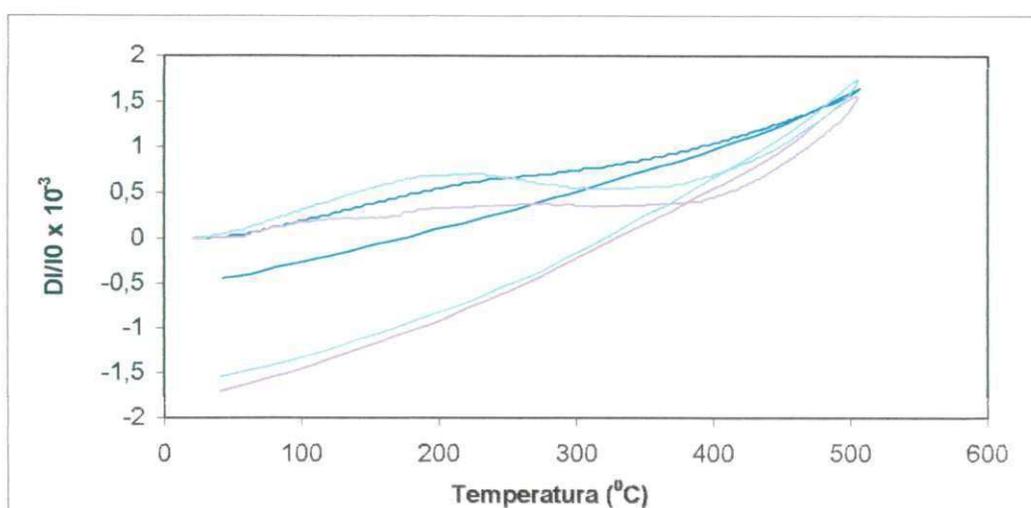


Figura A.22 - Dilatometria dos corpos de prova não afetados e autoclavados por 1h

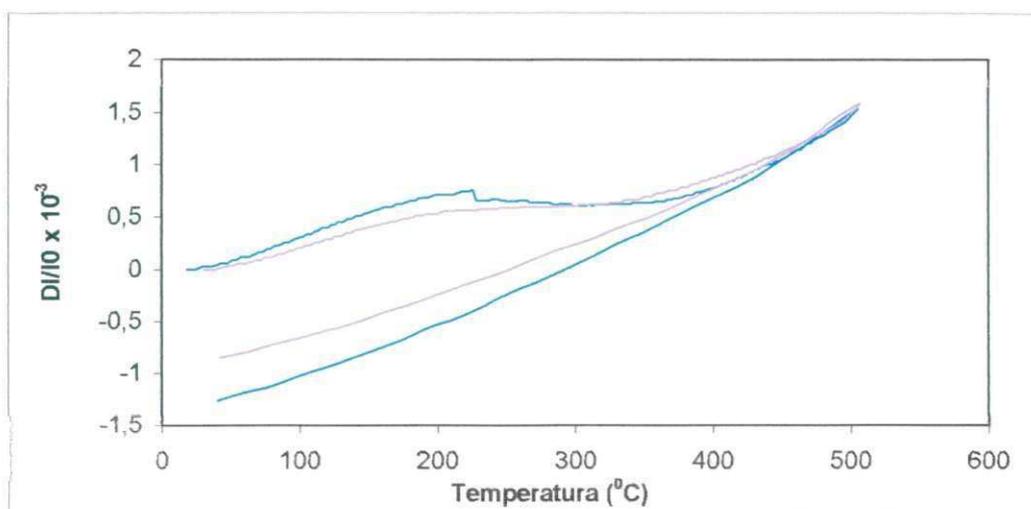


Figura A.23 - Dilatometria dos corpos de prova não afetados autoclavados por 5h

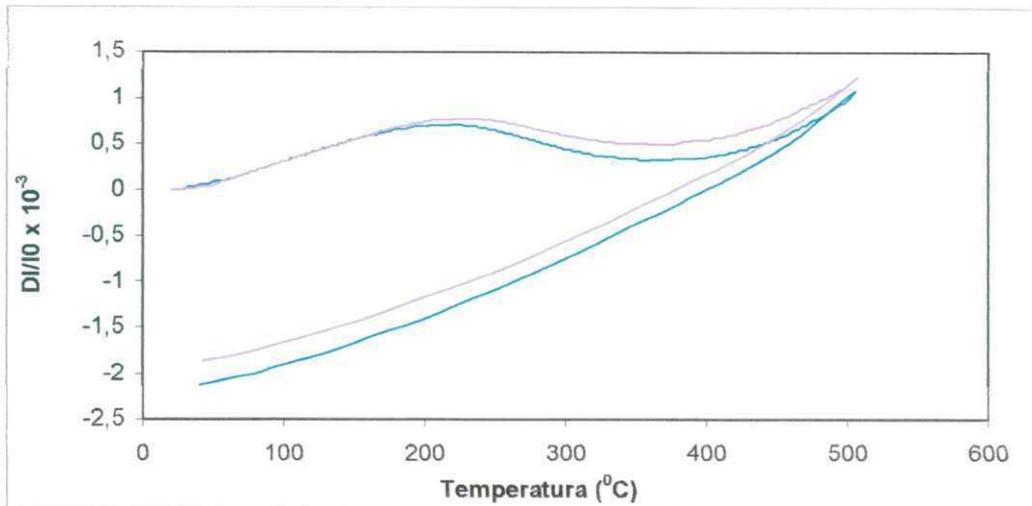


Figura A.24 - Dilatometria dos corpos de prova afetados autoclavados por 5h

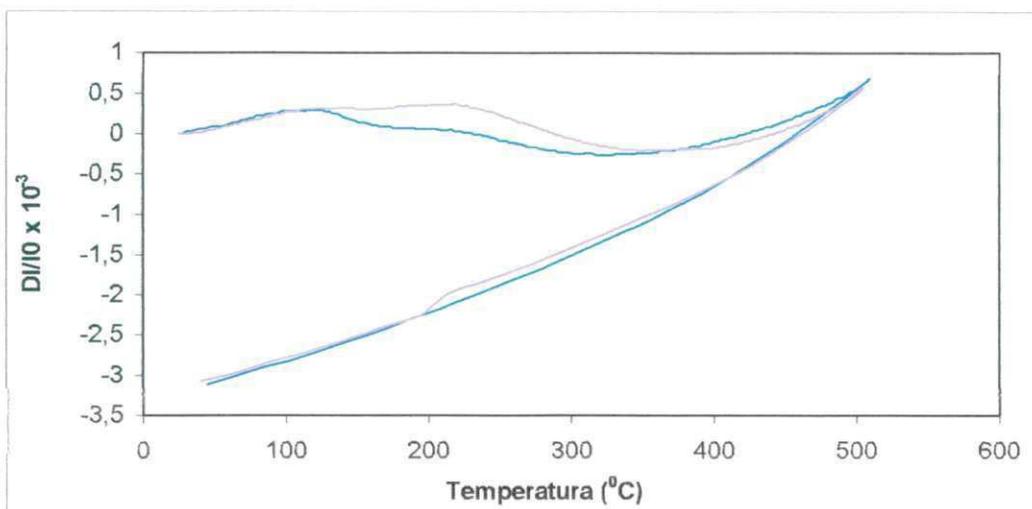


Figura A.25- Dilatometrias dos corpos de prova afetados e autoclavados por 10h

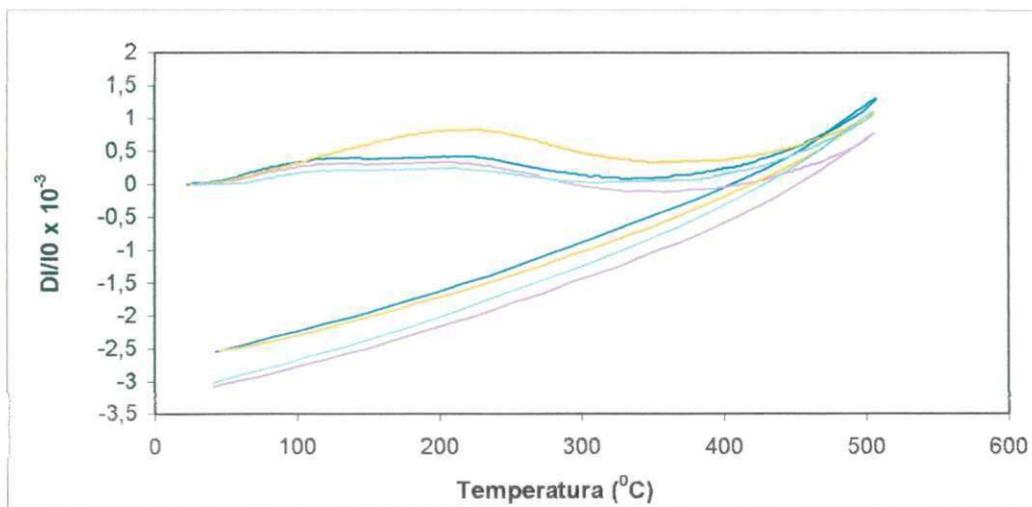


Figura A.26 - Dilatometria dos corpos de prova não afetados e autoclavados por 10h

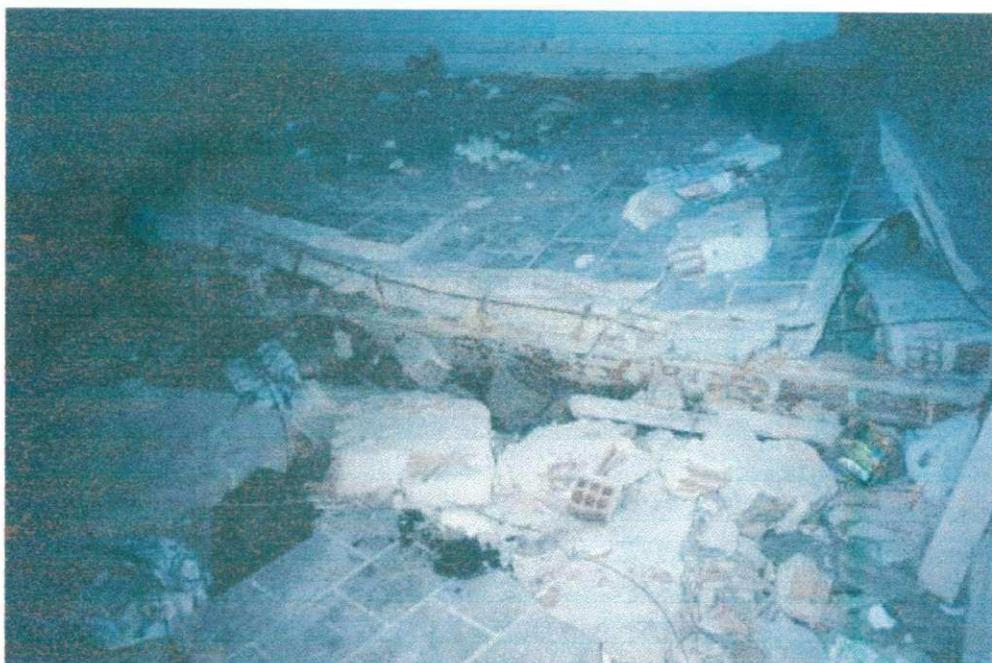
## 8.2 FOTOS DO EDIFÍCIO AQUARELA



Foto 1 - Face leste do Edifício Aquarela



Foto 2 – Face interna com visão para o lado Norte



**Foto 3 – Laje do piso**



**Foto 4 – face Norte**



**Foto 5 – Parte interna com visão para o Sul geográfico**



**Foto 6 – Face leste**