

## Expansão por Umidade: Metodologia para sua Avaliação e Estudo de Casos

Romualdo Rodrigues Menezes<sup>a\*</sup>, Lizabetha Fernanda Campos<sup>b</sup>,  
Helaine Sivini Ferreira<sup>c</sup>, Heber Carlos Ferreira<sup>b</sup>

<sup>a</sup>CPGCEM, Laboratório de Síntese e Processamento de Materiais Cerâmicos, LaSP,  
Universidade Federal de São Carlos, 13565-905 São Carlos - SP, Brasil

<sup>b</sup>Departamento de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia,  
Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, Brasil

<sup>c</sup>Departamento de Educação, Universidade Rural de Pernambuco, Recife - PE, Brasil  
\*e-mail: rrmboaca@iris.ufscar.br

**Resumo:** A expansão por umidade (EPU) é um tema há muito discutido e já presente na normalização, no entanto existem algumas controvérsias no que diz respeito aos métodos utilizados para sua determinação. Este trabalho tem por objetivo analisar a EPU de peças que sofreram falha em serviço, bem como discutir uma metodologia, que busca prever a expansão natural de peças cerâmicas. Foram estudadas amostras de revestimentos que sofreram destacamento em serviço e de tijolos oriundos de um edifício que sofreu colapso estrutural. Também foram coletadas amostras de tijolos e matérias-primas de olarias do Estado da Paraíba. Com as matérias-primas foram confeccionados corpos de prova que foram queimados em laboratório. As EPUs das amostras foram determinadas por requeima em dilatômetro e ensaios de imersão, fervura e autoclavagem. A metodologia utilizada visando a previsão da EPU natural dos corpos de prova utilizou-se de dados da literatura e experimentais. Com base nos resultados pode-se concluir que os revestimentos e os tijolos, do edifício que colapsou, apresentaram elevada EPU, superior a obtida com a fervura por 24 horas e que, com base na metodologia utilizada para prever a EPU natural dos corpos de prova, observou-se que a fervura por 24 horas equivale em alguns casos a uma expansão natural em torno de 36 meses, ou menos, enquanto que em outros casos, equivale a expansões em torno de 100 meses.

**Palavras-chave:** expansão por umidade, EPU, previsão, estudo de caso, materiais cerâmicos

### 1. Introdução

A expansão por umidade, EPU, é o termo técnico utilizado para designar a expansão sofrida por materiais cerâmicos quando em contato com a água na forma líquida ou de vapor. Este fenômeno ocorre lentamente e deve-se a adsorção da água pelas fases constituintes do produto cerâmico.

Analisando a atração intermolecular, a superfície de um sólido possui o que para os líquidos é chamada tensão superficial, e isto é responsável por uma compressão para o interior do sólido. Se a água ou outro líquido é adsorvido, esta adsorção irá reduzir a energia superficial do sólido, ocorrendo sua expansão<sup>1</sup>.

A superfície interna (acessibilidade à água), a energia específica e o módulo elástico do produto são os fatores que determinam sua EPU. As fases presentes no produto cerâmico têm estreita relação com esses fatores. As fases amorfas possuem elevada área específica e energia superficial, o que faz, com que sua presença nas peças cerâmicas contribua para o desenvolvimento de elevadas EPUs. Os materiais cristalinos têm áreas específicas menores e bem menos valências insaturadas na superfície (menor energia superficial) que os amorfos, contribuindo muito pouco para o desenvolvimento da EPU. Já os materiais vítreos não possuem uma elevada área específica e possuem uma energia superficial relativamente baixa, no entanto, permitem a difusão dos íons modificadores de estrutura para a superfície. E quanto lixiviados pela água, esses íons são removidos, sendo substituídos por íons H<sup>+</sup>, gerando-se superfícies semelhantes à dos materiais amorfos. Com a lixiviação pode ocorrer, também, a abertura de poros que estavam anteriormente selados, aumentando a superfície acessível à água.

A EPU é um fenômeno cuja determinação já apresenta normalizações<sup>2-5</sup>, com grande enfoque em revestimento cerâmicos. A normalização Brasileira, NBR 13818<sup>2</sup>, aplicada a revestimentos cerâmicos, tem por base as Normas ISO, e prescreve requeima a 550 °C por 2 horas e ensaio de fervura por 24 horas (seguido por requeima) para determinação da EPU “atual” e “potencial” respectivamente. No entanto, não indica um valor limite para a EPU de revestimentos cerâmicos, fazendo apenas um adendo que, EPUs acima de 0,6 mm/m podem contribuir para problemas de falha em serviço, caso sejam utilizadas práticas de fixação insatisfatórias ou as peças estejam sob condições climáticas favoráveis à EPU.

Embora a EPU seja um tema a muito discutido, existem algumas controvérsias no que diz respeito aos métodos utilizados para sua determinação. No que se refere às temperaturas de requeimas, grande parte da discussão está voltada a questão da possível influência da inversão do quartzo na determinação da EPU<sup>6</sup> e no fato de que a cinética de re-expansão dos corpos requeimados em temperaturas da ordem de 500 °C não é igual à cinética de expansão original<sup>7</sup>. E que requeimas entre 800 e 900 °C podem induzir a re-sinterizações.

No que tange a determinação da EPU “potencial” a discussão se dá em torno do tipo de ensaio mais adequado. A autoclavagem é posta em dúvida por utilizar temperaturas e pressões bem acima das condições de serviço, podendo fornecer dados não realísticos<sup>8</sup>. Já o ensaio de fervura, possui controvérsias por não propiciar, aparentemente, a obtenção da verdadeira expansão em potencial do material. Estima-se que uma fervura de 24 horas induza uma expansão equivalente a uma EPU natural de 36 meses<sup>9</sup>. Além do que, foi observado<sup>10,11</sup> que o

ensaio de fervura pode conduzir a alterações nas dimensões dos corpos de prova, devido a lixiviações, o que, implicaria que sua utilização deveria estar sempre associada a requeima em dilatômetro<sup>10</sup>.

Esse trabalho tem por objetivo analisar a EPU de peças que sofreram falha em serviço, bem como demonstrar uma metodologia, baseada em dados da literatura e resultados experimentais, que busca prever a expansão natural de peças cerâmicas.

## 2. Materiais e Métodos

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dados experimentais oriundos de pesquisas<sup>12,13</sup> realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande. Assim, os materiais descritos e as metodologias de ensaios apresentadas a seguir, serão referenciados quando relativos a esses estudos.

### 2.1. Materiais

Foram estudadas<sup>13</sup> quatro amostras de placas cerâmicas para revestimento comercializadas no Estado da Paraíba, provenientes do Estado de São Paulo. Duas dessas amostras, designadas por amostra A e B, foram originárias de descolamentos de piso de edificações nas Cidades de Cabedelo e Campina Grande, ambas no estado da Paraíba. As demais, designadas por C e D, foram adquiridas no comércio de Campina Grande e vêm sendo utilizadas em pesquisas no DEMa/UFCG, desde 1999.

A amostra A estava em uso há aproximadamente 1 ano e há 1 ano e meio sofreu descolamento do piso, enquanto que a amostra B estava em uso a aproximadamente 3 anos e há 2 anos sofreu descolamento do piso.

Também foram analisados<sup>12</sup> tijolos de alvenaria oriundos de edifício em alvenaria estrutural, da grande Recife, que sofreu colapso da alvenaria. As amostras retiradas do embasamento da estrutura foram identificadas por tijolos afetados (amostra TA), enquanto que os tijolos retirados da parte superior (paredes soltas) foram identificados como não afetados (amostra TNA). As amostras retiradas do embasamento estavam todas úmidas, enquanto que as retiradas da parte superior estavam secas. Como a cidade de Recife possui várias áreas de sua topografia abaixo do nível do mar, o nível do lençol freático na região da construção do edifício era superficial na época da coleta das amostras, permanecendo assim, por quase todo ano. Então, foram coletadas também amostras de água e de solo do local. A fim de analisar o seu teor de salinidade e o nível de agressividade à alvenaria.

A fim de avaliar a evolução da EPU com o aumento da severidade dos ensaios de indução a EPU, foram utilizadas três amostras de tijolos e argilas de olarias do Estado da Paraíba. As amostras de tijolos foram identificadas por B1, E1 e M1. Com as argilas, foram confeccionados corpos de prova em laboratório, após queima em várias temperaturas. Estes corpos de prova foram designados por LB1, LE1 e LM1.

### 2.2. Metodologia

As amostras de revestimento, foram serradas em corpos de prova de 50 mm x 7 mm x espessura da placa. Todos os corpos de prova foram cortados e lixados a seco, tal como indicado na literatura<sup>14,15</sup>. A EPU “atual” foi determinada utilizando-se requeimas a 550, 575 e 600 °C com 2 horas de patamar, em dilatômetro, com velocidade de aquecimento de 150 °C/h e resfriamento natural. A EPU é dada pela diferença de comprimento do corpo de prova após o ciclo de aquecimento e resfriamento. Após requeima, as amostras foram submetidas à fervura por 24, 48 e 96 horas e à autoclavagem a, 0,7 MPa, por 1, 2 e 4 horas e em seguida a novo ciclo de queima a 550, 575 e 600 °C (aquecimento a 150 °C/min e 2 horas de patamar e resfriamento natural) em dilatômetro para a determinação da EPU “potencial”<sup>13</sup>.

As amostras de água e solo foram ensaiadas para determinação do teor de sais solúveis. Os tijolos foram submetidos a ensaio de eflorescência segundo a metodologia da ASTM<sup>16</sup>, a fim de avaliar qualitativamente o seu teor de sais solúveis. Os tijolos foram serrados colocados parcialmente imersos em água destilada, a fim de haver o transporte por capilaridade da água para a parte superior, não imersa, da amostra. Com o tempo ocorre a evaporação da água pela parte superior da amostra, então caso haja sais solúveis, forma-se um depósito salino na superfície da amostra.

Foram serrados corpos de prova de 50 mm x 7 mm x 7 mm dos tijolos afetados e dos não afetados. Na requeima em dilatômetro para determinação da EPU “atual” e “potencial”, foi utilizada uma velocidade de aquecimento de 150 °C/h e temperatura de 500 °C, com patamar de 2 horas. Após a primeira requeima, as amostras foram submetidas à imersão por 15 e 90 dias, fervura por 2, 24 e 72 horas e autoclavagem, a 1 MPa, por 1 e 5 horas<sup>12</sup>.

As amostras B1, E1 e M1 foram serradas, enquanto que as amostras confeccionadas em laboratório, LB1, LE1 e LM1, já possuíam as dimensões de 50 mm x 7 mm x 7 mm. Essas amostras foram submetidas à imersão por 30, 60 e 90 dias, fervura por 8, 10 e 24 horas e autoclavagem a 0,7 MPa por 2, 4 e 5 horas. Os tratamentos de indução a EPU foram realizados após alguns dias da queima dos corpos de prova. A requeima em dilatômetro para determinação da EPU “potencial” seguiu o mesmo procedimento utilizado com as amostras de tijolos afetados e não afetados.

A Tabela 1 apresenta a absorção de água das amostras estudadas. A absorção dos revestimentos foi determinada após fervura em água destilada por 2 horas e a dos tijolos e dos corpos de prova confeccionados em laboratório após imersão em água destilada por 24 horas.

**Tabela 1.** Absorção de água das amostras estudadas.

Amostras	Temperatura de Queima	Absorção de Água (%)
Amostra A <sup>13</sup>	NC <sup>e</sup>	7,8
Amostra B <sup>13</sup>	NC <sup>e</sup>	7,4
Amostra C <sup>13</sup>	NC <sup>e</sup>	7,8
Amostra D <sup>13</sup>	NC <sup>e</sup>	8,0
Amostra TA <sup>12</sup>	NC <sup>e</sup>	ND <sup>d</sup>
Amostra TNA <sup>12</sup>	NC <sup>e</sup>	ND <sup>d</sup>
Amostra B1	NC <sup>e</sup>	7,5
Amostra E1	NC <sup>e</sup>	8,5
Amostra M1	NC <sup>e</sup>	9,0
	700 °C	11,4
	800 °C	11,4
Amostra LB1	900 °C	9,8
	1000 °C	7,3
	1100 °C	5,1
	700 °C	12,3
	800 °C	10,7
Amostra LE1	900 °C	7,0
	1000 °C	5,3
	1100 °C	2,6
	700 °C	12,5
	800 °C	11,6
Amostra LM1	900 °C	10,3
	1000 °C	8,5
	1100 °C	5,5

<sup>e</sup>Não conhecida.

<sup>d</sup>Não determinada.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Análise dos revestimentos

A Tabela 2 apresenta os resultados de EPU “atual” e “potencial” das amostras de revestimento cerâmico A, B, C e D, após requeima a 550, 575 e 600 °C. Pode-se observar que os resultados obtidos para as amostras A e B, após requeima a 550 °C, são extremamente elevados, atingindo valores de 0,08 e 0,114 % respectivamente. Esses valores são significativamente superiores ao valor de referência de 0,06% presente na normalização (NBR 13818<sup>2</sup>).

Com base na Tabela 2 verifica-se que o aumento da temperatura de requeima, até 600 °C, não influenciou na determinação da EPU “atual” das amostras analisadas. O que está de acordo com dados da literatura, que indicam que a granulometria das matérias-primas utilizadas na indústria de revestimentos cerâmicos é suficientemente fina para evitar efeitos da inversão do quartzo na determinação da EPU de revestimentos<sup>7</sup>.

A Tabela 2 apresenta os resultados de EPU “potencial” das amostras de revestimento A, B, C e D. Verifica-se novamente que a temperatura de requeima não apresentou influência significativa na determinação da EPU. Observa-se que os valores de EPU das amostras A e B, após fervura por 24 horas são significativamente inferiores aos obtidos para a EPU “atual” das peças. Valores de EPU semelhantes aos obtidos com a EPU “atual” só são observados após fervura por 96 horas, no caso da amostra A, e após autoclavagem por 1 hora, no caso da amostra B. O que evidencia que valores de EPU inferiores a 0,06%, após fervura por 24 horas, não garantem que esses materiais apresentarão estabilidade dimensional frente à umidade, durante sua vida útil.

Resultados<sup>9,17</sup> da literatura indicam que a expansão obtida com a fervura por 24 horas equivale a uma expansão natural de 36 meses. Os dados obtidos para as amostras A e B convergem para conclusões semelhantes a da literatura<sup>9,17</sup>, já que as peças, estavam em uso por não mais de 4 anos (a amostra A a apenas 1 ano e meio), o que, pressupondo um elevado tempo de estoque em distribuidores ou revendedores e que as peças apresentam estampas (design serigráfico) que podem ser consideradas “novas” ou bem atuais para a época em que foram colocadas em uso, implica em tempos de fabricação inferiores a 6 anos.

Os resultados obtidos para as amostras C e D, que apesar de não terem sido colocadas em uso e também possuem em torno de 6 anos de fabricação, ratificam as observações feitas anteriormente. Assim, aparentemente, o ensaio de fervura, não propicia a obtenção da verdadeira expansão potencial do material, ou de uma expansão equivalente a dezenas de anos de uso.

Resultados bem semelhantes foram observados em estudo<sup>18</sup> utilizando placas cerâmicas para revestimento nacionais que sofreram problemas de descolamento da argamassa de assentamento e que foram ensaiadas através de fervura e autoclavagem. Nesse estudo observou-se que a fervura por 24 horas não representava as expansões sofridas pelas peças após 10 anos de fabricação, e que apenas o tratamento por autoclavagem a 0,7 MPa conduzia a valores de EPU “potencial” superiores aos valores observados após os 10 anos de fabricação.

Tal como mencionado na literatura<sup>19</sup>, o ideal, seja usando fervura, autoclavagem ou vapor, seria estabelecer-se correlações entre resultados de expansão natural após vários anos com dados obtidos após tratamentos de indução de EPU, a fim de se obter indicações confiáveis das previsões. No entanto, em virtude das várias modificações nos ciclos de processamento e nos tipos de matérias-primas utilizadas pelas indústrias com o decorrer dos anos, é praticamente impossível esse tipo de análise nas indústrias brasileiras.

#### 3.2. Análise dos tijolos

O solo e a água do local onde a edificação, da qual foram retirados os tijolos, situava-se, foram analisados com relação ao teor de sais solúveis. Comparativamente com dados da literatura tem-se que a água do lençol freático tem um teor de salinidade considerado normal, enquanto o solo apresenta um baixo teor de salinidade<sup>20</sup>.

Os tijolos foram submetidos a ensaios de eflorescência a fim de analisar a presença e influência de sais solúveis na expansão do material. Os tijolos afetados não apresentaram eflorescência, enquanto que os não afetados apresentaram. O que indica que ocorreu a dissolução e lixiviação dos sais da alvenaria pelas águas do solo (de baixa salinidade) e que, provavelmente, expansões associadas a cristalizações de sais não influenciaram a expansão da alvenaria afetada, durante sua vida útil.

A Tabela 3 apresenta os resultados de EPU “atual” e “potencial” das amostras de tijolos. Pode-se observar que os tijolos afetados e não afetados apresentaram uma EPU “atual” excepcionalmente elevada, mesmo ao se levar em conta a idade do material, em torno de 15 anos. No entanto, os tijolos afetados apresentaram uma EPU “atual” aproximadamente 25% superior à EPU “atual” dos tijolos não afetados. Esses resultados evidenciam que a EPU de um corpo cerâmico está estreitamente relacionada com as condições do meio a que está exposto. Isso pode ser facilmente observado pela comparação dos resultados obtidos para os tijolos afetados e não afetados, após sua requeima e tratamento de indução a EPU, já que os valores tanto após a imersão, a fervura e a autoclavagem são bem semelhantes. O que ressalta, que as características de expansão dos materiais, mesmo

**Tabela 2.** EPU “atual” e “potencial” das amostras de revestimento<sup>13</sup>.

Amostras	Requeima	Atual (%)	Potencial (%)					
			Fervura			Autoclave		
			24 horas	48 horas	96 horas	1 hora	2 horas	4 horas
Amostra A	550 °C	0,080	0,054	0,069	0,086	0,111	0,103	0,144
	575 °C	0,082	0,054	0,059	0,096	0,106	0,109	0,135
	600 °C	0,074	0,052	0,065	0,094	0,104	0,108	0,135
Amostra B	550 °C	0,114	0,056	0,068	0,105	0,110	0,120	0,138
	575 °C	0,108	0,051	0,072	0,107	0,112	0,118	0,142
	600 °C	0,102	0,056	0,066	0,103	0,109	0,115	0,124
Amostra C	550 °C	0,048	0,037	0,043	0,053	0,058	0,063	0,083
	575 °C	0,048	0,032	0,048	0,054	0,057	0,063	0,083
	600 °C	0,048	0,034	0,043	0,053	0,066	0,062	0,083
Amostra D	550 °C	0,151	0,088	0,094	0,153	0,151	0,169	0,211
	575 °C	0,158	0,087	0,104	0,158	0,165	0,177	0,218
	600 °C	0,154	0,077	0,096	0,147	0,158	0,176	0,217

após 15 anos e condições de exposição diferentes (durante sua vida útil), continuam similares.

Com base na Tabela 3 observa-se que o valor da EPU “atual” observada nos tijolos afetados só é atingido com ensaios de autoclavagem. No entanto, o valor observado para os tijolos não afetados é inferior ao valor obtido com a autoclavagem, mas superior ao observado após fervura por 72 horas. Assim, verifica-se que o ensaio de fervura por 24 horas aparenta não fornecer resultados de EPU indicativos do comportamento de expansão após longos períodos de tempos (da ordem de dezenas de anos). E que, aparentemente, o tipo de ensaio para indução da EPU futura de peças cerâmicas deveria está relacionado ao tipo de material e de suas condições de uso, tal como já evidenciado na literatura<sup>17</sup>.

### 3.3. Análise do comportamento de expansão

A Tabela 4 apresenta a EPU “atual” e “potencial” das amostras de tijolos, B1, E1 e M1, coletadas em olarias do estado da Paraíba. Pode-se observar que todas as amostras apresentaram, após fervura por 24 horas, EPU inferior a 0,06%. E, tal como esperado, ocorreu a elevação dos valores de EPU conforme se aumentou a severidade do ensaio de indução à expansão.

É sabido que tanto a expansão natural como a obtida por ensaios de indução aumenta rapidamente nos estágios iniciais, todavia sua taxa de aumento decresce nos estágios seguintes. O interessante é que, ao se analisar a expansão, seja ela natural ou obtida após autoclavagem, em função do logaritmo do tempo, observa-se uma relação linear<sup>21</sup>. Várias evidências mostram que quando medidas precisas são efetuadas os corpos cerâmicos expandem continuamente com o

tempo, com a cinética que rege o fenômeno podendo ser linear em função do logaritmo do tempo<sup>22</sup>. Estudos demonstram<sup>23</sup> que este tipo de relação não é incomum nos materiais cerâmicos e nos fenômenos químicos e pode ser descrito pela equação de Roginsky-Zeldovitch (R-Z),

$$dq / dt = \alpha_1 \exp^{(-b_1 q)} \quad (1)$$

onde, para um processo de químio-sorção,  $q$  é a quantidade de gás adsorvido no tempo  $t$  e  $\alpha_1$  e  $b_1$  são constantes.

Assim, fazendo-se as adequações necessárias e integrando a Equação 1, a EPU pode ser descrita por uma equação do tipo<sup>23</sup>;

$$EPU = m_1 + n_1 \ln(t + k_1) \quad (2)$$

Embora o fenômeno da EPU seja bem aceito e muitas causas fundamentais tenham sido identificadas, os mecanismos de expansão ainda não foram precisamente definidos. Nenhuma equação representa exatamente o avanço da EPU com o tempo de exposição, todavia a forma integrada da equação de Roginsky-Zeldovitch é a preferida para se fazer previsões a cerca da expansão natural em muitos fins práticos, tendo se mostrado inestimável por permitir que dados de uma larga variedade de amostras sejam incluídas em uma só relação entre a expansão acelerada em autoclave e a expansão natural<sup>24</sup>.

Partindo-se do pressuposto que a EPU natural pode ser expressa em função do logaritmo do tempo, buscou-se modelar e estimar a expansão natural das amostras B1, E1 e M1, utilizando-se os resultados de EPU “potencial” presentes nas Tabela 4 e dados da literatura. Com base em resultados da literatura<sup>25-30</sup> definiu-se que a EPU após

**Tabela 3.** EPU “atual” e “potencial” das amostras de tijolos TA e TNA<sup>12</sup>.

Amostras	Atual (%)	Potencial (%)						
		Imersão		Fervura			Autoclave	
		15 dias	90 dias	2 horas	24 horas	72 horas	1 hora	5 horas
Amostra TA	0,188	0,030	0,050	0,030	0,060	0,075	0,160	0,200
Amostra TNA	0,146	0,040	0,045	0,060	0,070	0,080	0,160	0,205

**Tabela 4.** EPU “potencial” das amostras de tijolos B1, E1 e M1 e dos corpos de prova confeccionados em laboratório.

Amostras	Queima	EPU “Potencial” (%)								
		Imersão			Fervura			Autoclavagem		
		30 dias	60 dias	90 dias	8 horas	10 horas	24 horas	2 horas	4 horas	5 horas
Amostra B1		0,014	0,035	0,036	0,040	0,051	0,054	0,093	0,097	0,119
Amostra E1		0,006	0,011	0,011	0,014	0,020	0,037	0,100	0,117	0,120
Amostra M1		0,010	0,019	0,024	0,035	0,039	0,057	0,070	0,080	0,085
Amostra LB1	700 °C	0,003	0,008	0,011	0,019	0,020	0,041	0,098	0,132	0,169
	800 °C	0,001	0,004	0,008	0,012	0,016	0,036	0,049	0,069	0,089
	900 °C	0,053	0,058	0,062	0,069	0,075	0,077	0,092	0,098	0,098
	1000 °C	0,012	0,012	0,016	0,014	0,017	0,018	0,039	0,044	0,057
	1100 °C	0,001	0,003	0,005	0,005	0,006	0,008	0,012	0,017	0,019
Amostra LE1	700 °C	0,003	0,003	0,012	0,024	0,028	0,056	0,163	0,234	0,294
	800 °C	0,002	0,004	0,006	0,018	0,020	0,036	0,100	0,107	0,110
	900 °C	0,056	0,061	0,064	0,075	0,079	0,100	0,090	0,114	0,135
	1000 °C	0,005	0,010	0,014	0,011	0,012	0,013	0,040	0,053	0,057
Amostra LM1	1100 °C	0,002	0,002	0,005	0,007	0,007	0,008	0,014	0,014	0,016
	700 °C	0,005	0,007	0,009	0,057	0,061	0,090	0,120	0,242	0,362
	800 °C	0,001	0,003	0,005	0,028	0,030	0,045	0,078	0,096	0,114
	900 °C	0,060	0,077	0,084	0,090	0,093	0,101	0,106	0,114	0,121
	1000 °C	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,021	0,043	0,056	0,064
	1100 °C	0,005	0,006	0,007	0,006	0,007	0,008	0,010	0,015	0,018

imersão por 90 dias seria aproximadamente equivalente a uma EPU natural de 1 ano, com referência ao nível de absorção de água das amostras estudadas. E que a EPU obtida após autoclavagem por 4 horas na pressão de 0,7 MPa seria aproximadamente equivalente a uma EPU natural de 30 anos. Assim, utilizando-se da Equação 2, e assumindo a constante  $k_i$  igual a zero, já que se está fazendo previsões para longos períodos de tempo e não se está levando em consideração a EPU do material nos primeiros dias após sua fabricação, foi obtida a Figura 1.

Com base na Figura 1 pode-se observar que a metodologia utilizada permite que ensaios rápidos, de autoclavagem e de imersão, possam ser utilizados para a previsão de EPU's naturais após longos períodos de tempos. O acompanhamento das EPU's de amostras presentes em laboratório já estão sendo efetuadas, a fim de comprovar essa metodologia, no entanto, apenas resultados após 15, 20 anos podem comprovar definitivamente a metodologia. Entretanto, a análise dos resultados de EPU "atual" dos tijolos oriundos do edifício que apresentou falência estrutural, evidencia que os valores de EPU após 15 anos de uso vêm de encontro às estimativas realizadas com essa metodologia, bastando para isso, analisar os resultados de EPU após

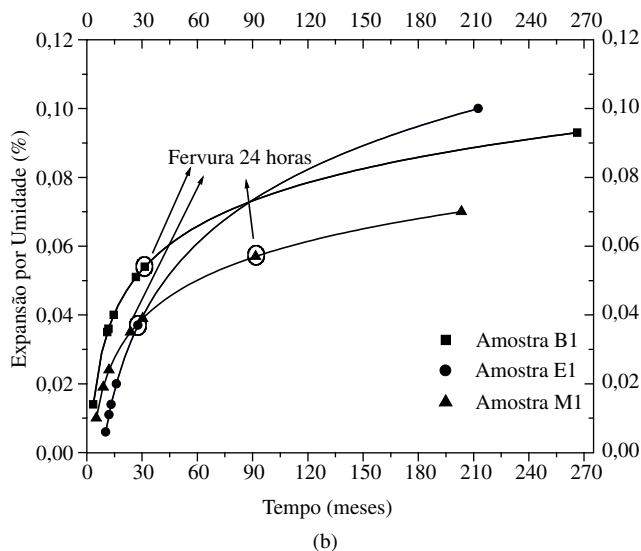
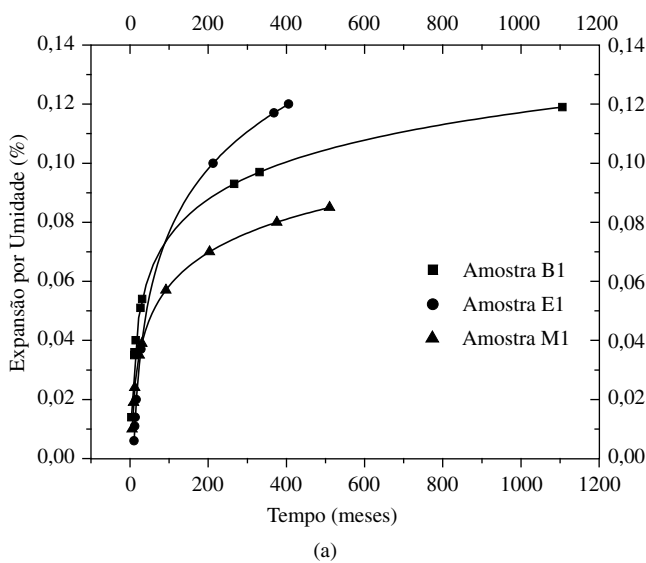


Figura 1. EPU em função do tempo das amostras B1, E1 e M1.

autoclavagem por 1 hora. Não foi realizada a simulação do comportamento de expansão desses tijolos porque não se tinham valores de EPU's após autoclavagem por 4 horas e na pressão de 0,7 MPa.

Ao analisar se as curvas presentes na Figura 1b pode-se observar que, no caso de duas amostras (B1 e E1), a fervura por 24 horas aparenta realmente ser equivalente a expansões naturais em torno de 36 meses, tal como indicado na literatura<sup>9,17</sup>. Entretanto a amostra M1 apresentou valores de EPU após a fervura por 24 horas que equivalente a expansões naturais em torno de 100 meses. O que evidencia, novamente, que os resultados de um ensaio de indução estão muito associados com as características e peculiaridades de cada tipo de material.

A Tabela 4 apresenta os resultados de EPU das amostras queimadas em laboratório (LB1, LE1, LM1). A Figura 2 apresenta o comportamento da EPU "potencial" da amostra LB1. O comportamento ilustrado na Figura 2 é semelhante ao das amostras E1 e M1 frente à temperatura de queima. Com base na Figura 2 observa-se que há um decréscimo seguido por um aumento e posterior decréscimo da EPU com o aumento da temperatura de queima. Esse é o comportamento clássico da EPU de peças cerâmicas frente suas temperaturas de queima e está associado à formação de fases amorfas em torno, no caso desses materiais, da temperatura de 900 °C.

Utilizando a metodologia descrita anteriormente para correlacionar os valores de EPU obtidos com os ensaios de imersão, fervura e autoclavagem com a expansão natural dos materiais, foi construída a Figura 3, para a amostra LB1. O comportamento da amostra LB1 é semelhante ao das amostras LE1 e LM1, ilustrados na Figura 4.

Com base na Figura 3 pode-se observar que a provável presença de fases amorfas nos corpos de prova queimados a 900 °C, tal como indicado na Figura 2, implica em uma elevada EPU logo nos primeiros anos de uso do material, com a taxa de expansão decrescendo continuamente. Após, aproximadamente 40 meses, a taxa de expansão passa a ser semelhante às observadas nos corpos de prova queimados nas temperaturas de 1000 e 1100 °C. Verifica-se também, que os corpos de prova queimados a 700 °C, apesar de possuírem uma EPU menor que os queimados a 900 °C, nos primeiros 20 meses de uso, apresentam uma taxa de expansão significativamente superior, fazendo com que esses corpos de prova atinjam valores de EPU superiores aos observados com a queima a 900 °C, com o passar do tempo.

A maior taxa de expansão observada nos corpos de prova queimados a 700 °C, em relação àqueles queimados a 900 °C, também é observada nos materiais queimados a 800 °C até o período de 60 a

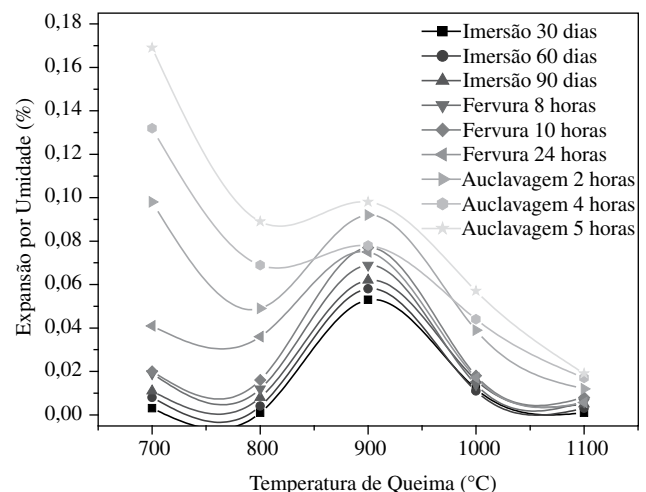


Figura 2. EPU vs. temperatura de queima da amostra LB1.

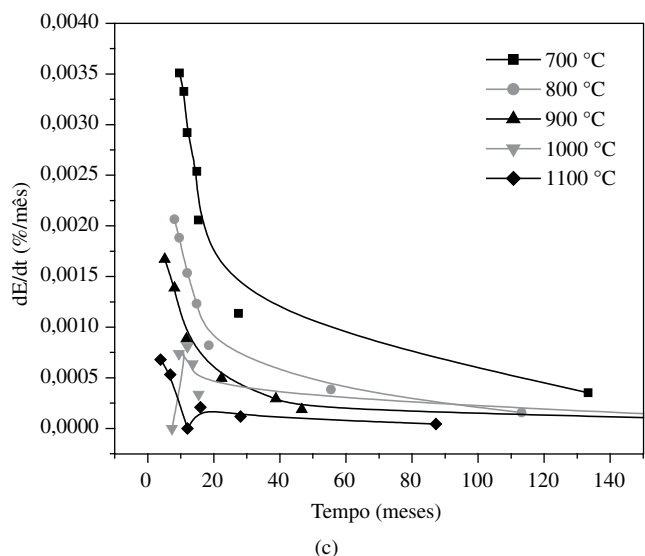
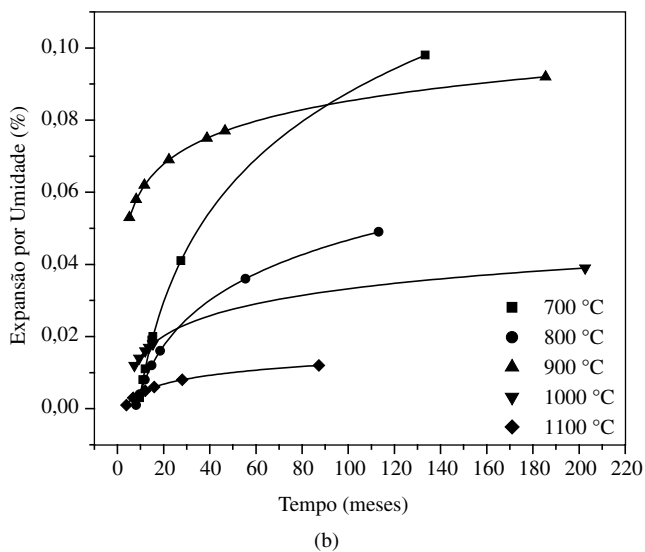
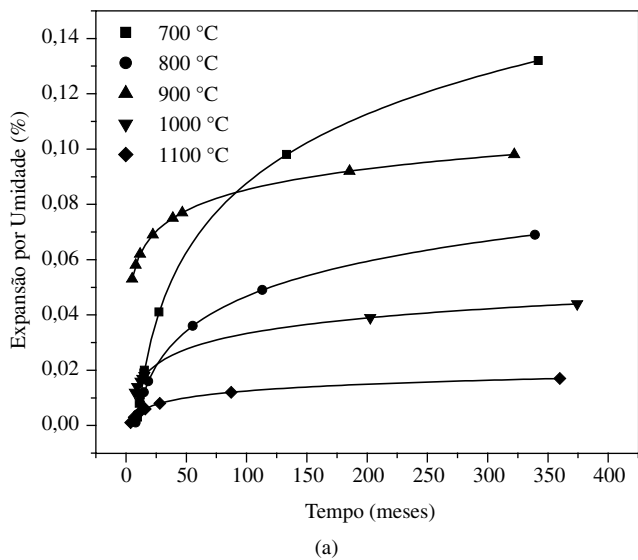


Figura 3. EPU em função do tempo da amostra LB1 a) e b) e sua derivada c).

80 meses. Essas elevadas taxas estão provavelmente associadas a grande porosidade e área específica (elevada acessibilidade da água ao interior do material) que os materiais queimados nessas baixas temperaturas apresentam.

Os valores de EPU após fervura por 24 horas das amostras LB1, LE1 e LM1, foram associados, de acordo com as Figura 3 e 4, a tempos bem distintos de expansão natural. Observou-se um comportamento semelhante em todas as amostras. Nas temperaturas de queima de 700, 1000 e 1100 °C, a EPU foi associada a tempos de expansão natural em torno de 36 meses ou inferiores. Enquanto que nas amostras queimadas a 800 e 900 °C a EPU obtida após fervura por 24 horas foi associada a tempos de expansão que variaram de 46 a 138 meses. Ainda não se tem uma justificativa totalmente fundamentada para esse comportamento, o que pode explicar porque a fervura por 24 horas fornece, em alguns casos, valores que são indicações confiáveis sobre a EPU após longos períodos de tempo e em outros casos não.

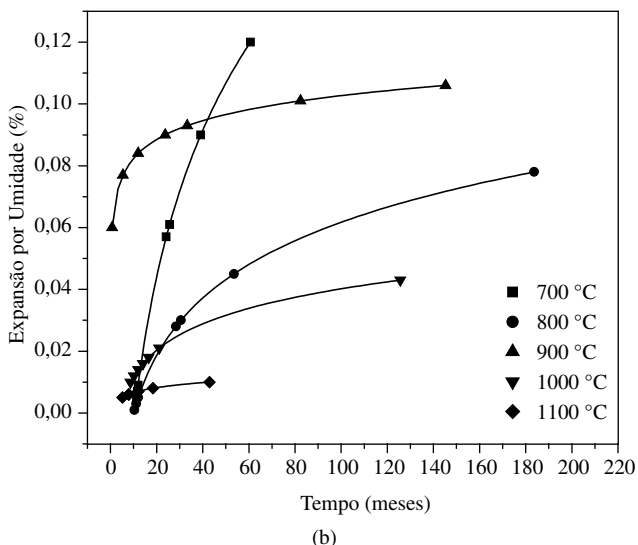
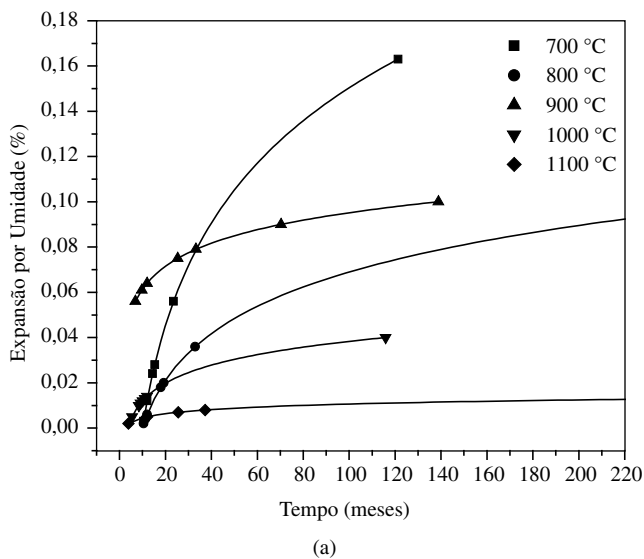


Figura 4. EPU em função do tempo das amostras LE1 a) e LM1 b).

## 4. Conclusões

Esse trabalho teve por objetivo analisar a EPU de peças que sofreram falha em serviço, bem como discutir uma metodologia, baseada em dados da literatura e resultados experimentais, que busca prever a expansão natural de peças cerâmicas. Podendo-se concluir que: os revestimentos que destacaram do piso possuíam elevada EPU, superior a indicada com a fervura por 24 horas; os tijolos oriundos de edifício que apresentou falência estrutural, apresentaram EPU extremamente elevadas, com os tijolos do embasamento possuindo uma EPU cerca de 25% superior a EPU dos tijolos da parte superior; o ensaio de fervura por 24 horas aparenta não indicar uma EPU potencial referente a longos períodos de anos; com base na metodologia utilizada para prever a EPU natural dos corpos de prova, observou-se que a fervura por 24 horas equivale em alguns casos a uma expansão natural em torno de 36 meses, ou menos, enquanto que em outros casos, equivale a expansões em torno de 100 meses; com base na metodologia de previsão de expansão natural utilizada, observa-se que a taxa de expansão está intimamente associada a temperatura de queima do material; e que a previsão da EPU natural utilizando-se da metodologia descrita pode fornecer indicações sobre o comportamento de expansão das peças cerâmicas, após longos períodos de tempo, muito mais confiáveis do que às obtidas apenas com um único ensaio de fervura.

## Referências

- Smith, A. N. Investigations on the moisture expansion of porous ceramics bodies. **Trans. Brit. Ceram. Soc.**, London, v. 54, n. 5, p. 300-311. 1955.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997. 78 p.
- European Standard. **EN 155: Ceramic tiles** – Determination of moisture expansion using boiling water – unglazed tiles. London, 1991. 4 p.
- International Organization For Standardization. **ISO 10545: Ceramic tiles** – Part 1 – 16. London, 1999. 4 p.
- American Standard. **ASTM C370-56**: Test method for moisture expansion of fired whiteware products. New York, 1994. 5 p.
- Robinson, G. C. The reversibility of moisture expansion. **Am. Ceram. Soc. Bull.**, Westerville, v. 64, n. 5, p. 712-716. 1985.
- Cole, W. F.; Banks, J. P. Studies on the moisture expansion of monocottura floor tiles of australian manufacture, London, **Key Engineering Materials**, Zurich, v. 53-55, p. 185-189. 1991.
- Young, J. E.; Brownell, W. E. J. Moisture expansion of clays products, **J. Am. Ceram. Soc.**, Westerville, v. 42, n. 12, p. 571-582. 1959.
- Bowman, R. The need for establishing a moisture expansion convention for the analysis of tiling system failures. Disponível em <www.dbce.csiro.au>. Acesso em: 24 março 1999.
- Menezes, R. R. et al. Expansão por umidade em pisos cerâmicos de queima rápida – análise crítica da metodologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 46, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica, 2002. CD-ROM.
- Menezes, R. R. et al. Análise da expansão por umidade e absorção de água de pisos cerâmicos comerciais em relação à composição química e a quantidade estimada de fase vítrea. **Cerâmica**, São Paulo, v. 49, n. 310, p. 72-82. 2003.
- Miranda, F. S. **Estudo da expansão por umidade e da resistência mecânica dos tijolos do edifício aquarela, Jaboatão dos Guararapes - PE**. 2001. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2001.
- Raposo, A. E. **Influência da temperatura e da metodologia de indução na determinação da expansão por umidade em placas cerâmicas para revestimento**. 2003. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.
- Hosking, J. S.; Hueber, H. V. Moisture expansion, “moisture movement” and “drying shrinkage” of structural clay products. **Trans. Brit. Ceram. Soc.**, London, v. 59, p. 107-120. 1960.
- Menezes, R. R. et al. Aspectos fundamentais da expansão por umidade – uma revisão. **Cerâmica**, São Paulo, Trabalho não publicado.
- American Standard. **ASTM C67-92**: Standard test method of sampling and testing brick and structural clay tile. New York, 1992. 4 p.
- Bowman, R. Moisture expansion kinetics as a function of conditioning. Disponível em <www.infotile.com.au>. Acesso em: 12 outubro 2004.
- Bauer, R. J. F.; Rago, F. Expansão por umidade de placas cerâmicas para revestimento. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 41-45. 2000.
- Bowman, R. Improving the accuracy of moisture expansion determinations. **Industrial Ceramics**, Amsterdam, v. 16, n. 2, p. 89-95. 1996.
- Ribeiro, I. J. C. **Os sais solúveis na construção civil**. 1996. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.
- Cole, W. F. Moisture expansion relationships for a fired kaolinite-hydrous mica-quartz clay. **Nature**, New York, v. 192, n. 4804, p. 737-741. 1961.
- Cole, W. F. Moisture expansion of a ceramic body and its internal surface area. **J. Am. Ceram. Soc.**, Westerville, v. 45, n. 9, p. 428-432. 1962.
- Cole, W. F.; BIRTWISTLE, R. Kinetics of moisture expansion of ceramic bodies. **Am. Ceram. Soc. Bull.**, Westerville, v. 48, n. 12, p. 1128-1132. 1969.
- Bowman, R., The need for determination of the relevant moisture expansion of a brick. **J. Aust. Ceram. Soc.**, Sidney, v. 21, n. 1, p. 13-17. 1985.
- Geller, R. F.; CREAMER, A. S. Note on moisture expansion of ceramic whiteware in storage and in service. **J. Am. Ceram. Soc.**, Westerville, v. 24, n. 3, p. 77-79. 1941.
- Thiemecke, H. Notes on moisture expansion. **J. Am. Ceram. Soc.**, Westerville, v. 27, n. 12, p. 355-357. 1944.
- Smith, R. G. Moisture expansion of structural ceramics – IV expansion of unrestrained fletton brickwork. **Trans. Brit. Ceram. Soc.**, London, v. 72, p. 191-197. 1973.
- Bernett, F. E. Effects of moisture expansion of installed quarry tile. **Am. Ceram. Soc. Bull.**, Westerville, v. 55, n. 12, p. 1039-1043. 1976.
- Cole, W. F. On the predictions of long-term natural moisture expansion of fired clay bricks. **J. Aust. Ceram. Soc.**, Sidney, v. 24, n. 1, p. 81-85. 1988.
- Smith, R. G. Moisture expansion of structural ceramics V – 28 years of expansion. **Trans. Brit. Ceram. Soc.**, London, v. 92, n. 6, p. 233-239. 1993.