

# Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais

V. R. Batista<sup>1</sup>; J. J. S. Nascimento<sup>2</sup>; A. G. B de Lima<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, CEP: 58109-970, Campina Grande – PB, Brasil

<sup>2</sup>Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica– Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, CEP: 58109-970, Campina Grande – PB, Brasil

(Recebido em 25/02/2008; revisado em 30/04/2008; aceito em 10/05/2008)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

---

## Resumo:

O objetivo desta pesquisa é estudar experimentalmente a secagem, queima e choque térmico de amostras de tijolos cerâmicos maciços e vazados de argila para cerâmica vermelha, com diferentes dimensões e teores de umidades iniciais. No ambiente de secagem, várias temperaturas e umidades relativas foram usadas, obtendo-se assim várias curvas de cinética de secagem e encolhimento. O processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente e a retração volumétrica ocorre em dois períodos. Através de ensaio de compressão obteve-se valores de módulo de resistência a compressão ( $\sigma_f$ ) em torno de 2,49 MPa e 2,79 MPa para tijolos queimados a 900°C e 950°C, respectivamente, e para os mesmos tijolos obteve-se valores de resistência ao choque térmico (RCT) de 430,24W/m e 549,91W/m, respectivamente. Para as condições adotadas de ensaio de choque térmico, não houve danos estruturais nos corpos de prova.

**Palavras-chave:** Secagem; encolhimento; blocos vazados; choque térmico.

---

## Abstract:

The aim of this research is to study the drying, firing and thermal shock in holed red ceramic clay bricks with different dimensions and initial moisture content. In the drying process, several relative humidities and temperatures were used, and thus several curves of the drying kinetics and shrinkage are shown and analyzed. The drying process takes place in the falling rate period and the shrinkage happens in two periods. From compression test was obtained values of compression resistance module ( $\sigma_f$ ) around 2.49 MPa and 2.79 MPa for bricks fired at 900°C and 950°C, respectively and for the same bricks it was obtained thermal shock resistance (RCT) of 430.24W/m and 549.91W/m, respectively. For experimental conditions of thermal shock it was not found structural damages for the samples.

**Keywords:** Drying; shrinkage; holed blocks; thermal shocks.

---

\* E-mail: [gilson@dem.ufcg.edu.br](mailto:gilson@dem.ufcg.edu.br) (A.G.B. de Lima)

## 1. Introdução

Secar é um processo de transferência de calor e massa incluindo o encolhimento que acontece em corpos porosos. O parâmetro principal para se obter um ótimo processo de secagem é a taxa de secagem. O controle deste parâmetro pode prevenir rachaduras, fissuras e deformações.

Muitos pesquisadores têm estudado o processo de secagem de argila [1-8]. Durante a secagem de sólidos, tem-se o fenômeno de encolhimento, que altera a cinética de secagem e as dimensões do sólido. Este fenômeno acontece simultaneamente com o transporte de umidade e é mais intenso em materiais cerâmicos com umidade inicial alta, e principalmente em produtos de granulação fina. Dependendo das condições de secagem, da estrutura do material e da geometria do produto, o fenômeno de encolhimento pode causar rachaduras, deformações e até mesmo fraturas dentro dos sólidos. Então, é muito importante estudar a secagem junto com o encolhimento.

Neste trabalho particularmente é estudado a secagem de blocos cerâmicos ou tijolos furados. O ideal para a especificação de um tijolo é o atendimento às normas brasileiras (Tijolos maciços: NBR 6460/83, NBR 7170/83, NBR 8041/83; Blocos vazados: NBR 6461/83, NBR 8043/83, NBR 7171/92, NBR 8042/92). Porém, em geral, não se encontram no mercado produtos de conformidade com as mesmas, pelo próprio caráter ainda artesanal do produto, o que evidencia a necessidade de um estudo mais apurado nessa área que ainda pode se desenvolver bastante.

Na modelagem matemática com a inclusão do encolhimento, as propriedades relativas do fenômeno são incorporadas ao modelo. Porém, na literatura de secagem, há escassas informações sobre os coeficientes de encolhimento, como também de relações matemáticas entre difusividade de massa, encolhimento e densidade. No entanto na literatura, curvas de encolhimento linear versus umidade, podem ser encontradas [3], [6], [9], [10], [11]. Neste contexto, há outros estudos como os que incluem o encolhimento volumétrico em materiais cerâmicos [4]-[5], [12]-[16]. Assim, estudar em uma área como a de cerâmica, que tem um gigantesco potencial de crescimento favorecerá a melhoria do processo de secagem.

Assim sendo, é importante um estudo que busca a otimização e controle do processo de retirada de água dos tijolos. Prever o comportamento da umidade com o passar do tempo constitui uma ferramenta de grande valia para a indústria de tijolos cerâmicos e evita desperdício de matérias-primas e economia de combustíveis.

Os tijolos cerâmicos, interesse desse trabalho, são peças bastante utilizadas pela indústria civil e o seu processo de fabricação compreende as diversas fases: exploração das jazidas, tratamento prévio das matérias primas, homogeneização, secagem e a queima. Neste sentido o tema a ser estudado está diretamente associado ao choque térmico de materiais cerâmicos. A fatura associada a este fenômeno, ocorre como resultado de tensões que são induzidas por uma rápida variação de temperatura [17].

Sendo assim, este trabalho propõe um estudo experimental da secagem, queima e comportamento ao choque térmico que podem ser observados durante os processos produtivos de tijolos furados a partir de uma argila para cerâmica vermelha oriunda do município de Itaporanga-PB.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Matéria

Para este estudo experimental foi usada uma argila para cerâmica vermelha do município de Itaporanga-PB cuja composição química é descrita na Tabela 1.

Analisando o resultado da composição química da massa cerâmica (Tabela 1), verifica-se que a argila estudada apresenta teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) 52,70%, proveniente dos minerais argilosos e da sílica livre. O teor de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é 23,97%, oriunda dos argilominerais e do feldspato, aumenta a refratariedade da argila. O teor de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) superior a 7%, indica que a argila apresentará, após a queima, a coloração vermelha devida, principalmente, a oxidação do composto de ferro que ao final apresenta-se sob a forma de óxido férrico. A intensidade da coloração vermelha depende da quantidade de óxido férrico presente.

Tabela 1. Composição química das argilas.

Componentes	RI	PR	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$
Composição química (%)	1,10	7,82	52,70	7,58	23,97	0,56	4,04	0,62	1,25

## 2.2. Análise mineralógica

Para a realização da análise mineralógica da argila, a amostra foi secada em estufa a 110°C e passada em peneira ABNT n° 200 (0,074mm). Em seguida, foi submetida a uma difração de raios-X em um Difratorômetro de raios-X modelo XRD – 6000 da Shimadzu com ângulo de varredura variando de  $2\theta=5^\circ$  a  $2\theta=80^\circ$ . Os valores das distâncias interplanares basais é calculado através da seguinte relação de Bragg simplificada:  $n\lambda=2d'\text{sen}(\theta)$ , onde  $\lambda=1,5418\text{\AA}$  é o comprimento de onda ou radiação do cobre,  $d'$  é a distância interplanar basal (característica para cada fase cristalina) e  $n$  é a “ordem de reflexão” que neste caso será considerado igual a um, porque se faz corresponder a um dado plano de índices (hkl) um único ângulo  $\theta$ .

## 2.3. Análise térmica

Os ensaios térmicos e gravimétricos foram realizados em um Sistema de Análises Térmicas, sob um patamar de aquecimento de 12,5°C/min até atingir a temperatura de 1000°C.

## 2.4. Preparação dos corpos de prova de argila

Os blocos cerâmicos vazados com seis furos (cerâmica vermelha) foram moldados por extrusão em uma extrusora de laboratório tipo Verdés, modelo BR 051. A geometria dos corpos de prova é ilustrada na Figura 1.

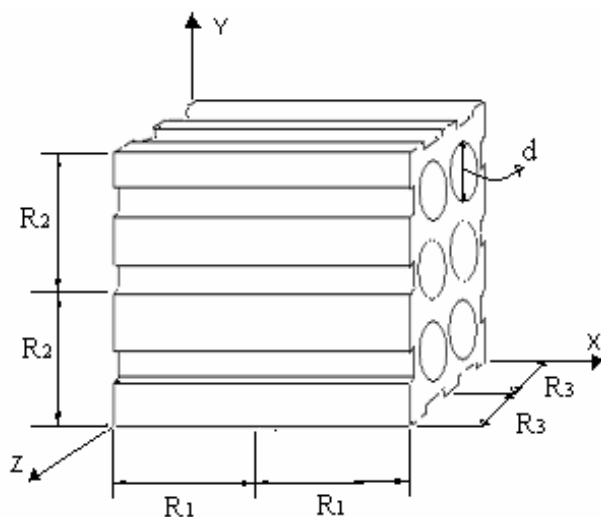


Figura 1. Ilustração do corpo de prova e suas dimensões

## 2.5. Secagem das amostras

Os tijolos foram secados colocando-os em estufa sem circulação de ar em temperaturas e umidades relativas diferentes. O primeiro passo de cada experiência era pesar as amostras e medir o comprimento delas em intervalos de 10 minutos para as três primeiras medidas e o restante das medidas eram feitas em intervalos de 30 minutos durante o processo de secagem. As massas das amostras foram obtidas por uma balança eletrônica com precisão de  $\pm 0,01\text{g}$ ; as dimensões das amostras eram medidas usando um paquímetro digital com precisão de  $\pm 0,01\text{mm}$  e a umidade relativa do ar por um higrômetro.

As experiências contínuas de secagem terminaram quando a massa alcançou um valor constante. Para obter o valor da umidade de equilíbrio e a massa de seco delas, todas as amostras permaneceram na mesma temperatura durante 48 horas. Todos os testes foram executados a uma pressão atmosférica. A Tabela 2 apresenta os tijolos cerâmicos e todas as condições de secagem que foram usadas neste estudo, onde 2R1, 2R2, 2R3 e d referem-se as dimensões iniciais dos tijolos. Nesta tabela, por exemplo, código CPC170 representa: experiência número 1 a 70 °C enquanto t representa o tempo total de secagem.

Tal procedimento citado anteriormente foi repetido em uma estufa com circulação de ar forçada com o objetivo de se verificar a influencia da localização do tijolo dentro da estufa. Para isto, quatro amostras foram dispostas dentro da estufa na mesma prateleira e sempre na mesma posição durante toda secagem conforme a Figura 2.

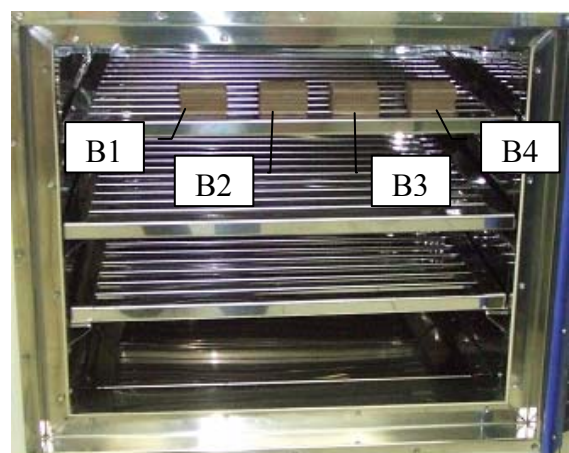


Figura 2. Disposição das amostras dentro da estufa de secagem com circulação forçada de ar.

## 2.6. Modelo Matemático

A equação seguinte foi utilizada para obter as mudanças de volume para cada tempo durante o processo de secagem [18]:

$$V_t = V_0(\beta_1 + \beta_2 M_{med}) \quad (1)$$

Em  $t = 0$ ,  $V_t = V_0$ , então tem-se que  $\beta_1 = 1$ . Logo a Equação 1 pode ser escrito como segue:

$$\frac{V_t}{V_0} = 1 - \beta_2(M_0 - M_{med}) \quad (2)$$

Tabela 2. Condições Experimentais usadas neste trabalho.

Amostra	Ar		Tijolos cerâmicos							t (min)
	T (°C)	U.R. (%)	Mo (b.s.)	Me (b.s.)	2R <sub>1</sub> (m) X 10 <sup>3</sup>	2R <sub>2</sub> (m) X 10 <sup>3</sup>	2R <sub>3</sub> (m) X 10 <sup>3</sup>	d (m) X 10 <sup>3</sup>		
Estufa sem circulação de ar	CPC170	70	8,84	0,2483	0,0090	66,04	57,81	35,13	11,42	300
	CPC270	70	8,84	0,2511	0,0087	66,68	57,91	35,18	11,38	300
	CPC370	70	8,84	0,2500	0,0080	64,52	57,74	34,64	11,44	300
	CPB590	90	4,01	0,2737	0,0035	59,71	57,68	34,58	11,61	300
	CPB690	90	4,01	0,2762	0,0050	60,99	57,89	35,02	11,75	300
	CPB790	90	4,01	0,2740	0,0035	62,92	57,48	34,87	11,32	300
	CPA1110	110	1,96	0,2455	0,0007	66,02	57,84	34,85	11,28	300
	CPA2110	110	1,96	0,2423	0,0002	65,31	57,64	34,98	11,14	300
	CPA3110	110	1,96	0,2335	0,0008	65,33	58,14	35,06	11,27	300
	Estufa com circulação forçada de ar	CPB190	90	3,77	0,24281	0,0014	62,61	57,25	34,57	10,94
CPB290		90	3,77	0,2432	0,0019	58,81	57,30	34,61	11,39	240
CPB390		90	3,77	0,2449	0,0022	61,72	57,15	34,50	11,10	240
CPB490		90	3,77	0,2444	0,0032	63,96	57,70	34,28	11,72	240

Definindo alguns parâmetros, a Equação 2 pode ser reescrita como segue:

$$\frac{V_t}{V_0} = \beta_3 + \beta_4 M_{med} \quad (3)$$

onde  $\beta_3$  e  $\beta_4$  são os coeficientes de encolhimento volumétrico e que foram obtidos por comparação com dados experimentais usando o método de Rosembrock e quasi-Newton com critério de convergência de 0,001 e  $M_{med}$  é o teor de umidade adimensional.  $M_0$  e  $M_{med}$  são respectivamente os teor de umidade inicial, teor de umidade de equilíbrio, e teor de umidade média dados em kg/kg. Considerando que o encolhimento é isotrópico e que a taxa de variação de  $(2R_1)t$ ,  $(2R_2)t$  e  $(2R_3)t$ , relacionam-se entre si (Figura 1) de tal forma que as taxas de variações permaneçam constantes, e que os diâmetros dos seis furos sejam idênticos e com iguais retrações, pode-se mostrar que: O volume de um bloco cerâmico com seis furos é dado pela diferença entre o volume total e o volume formado

pelos seis furos, como mostrado na Equação 4 a seguir:

$$V_t = 8(R_{1t}R_{2t}R_{3t}) - \left[ 6 \left( \pi \frac{d_t^2}{4} \right) 2R_{1t} \right] \quad (4)$$

Reformulando a Equação 4, tem-se:

$$V_t = R_{1t}(8R_{2t}R_{3t} - 3\pi d_t^2) \quad (5)$$

Vale salientar que para tijolos maciços,  $d_t = 0$ . A área superficial do bloco vazado é dada pela soma das áreas de todas as faces, inclusive a soma das áreas das paredes internas dos seis furos. Esta grandeza é calculada pela equação (6) a seguir.

$$S_t = 2(2R_{1t}2R_{2t}) + 2(2R_{1t}2R_{3t}) + \left[ 2(2R_{2t}2R_{3t}) - \left( 12\pi \frac{d_t^2}{4} \right) \right] + 6 \left( 2\pi \frac{d_t}{2} 2R_{1t} \right) \quad (6)$$

Reformulando a equação (6), tem-se:

$$S_t = 8 \left[ R_{1t} \left( R_{2t} + R_{3t} + 3\pi \frac{d_t}{2} \right) + R_{2t}R_{3t} - 3\pi \frac{d_t^2}{8} \right] \quad (7)$$

Em muitos processos industriais equações empíricas foram propostas por vários autores para descrever a cinética de secagem. Neste consenso, alguns pesquisadores tem usado solução em séries da equação de difusão para prever a cinética de secagem como segue:

$$Mmed^* = \sum_{i=1}^N A_i \exp^{(K_i t)} \quad (8)$$

$$Mmed^* = A_1 \exp^{(K_1 t)} + A_2 \exp^{(K_2 t)} + A_3 \exp^{(K_3 t)} \quad (9)$$

onde  $A_i$  e  $K_i$  são constantes que foram determinadas ajustando esta equação aos dados experimentais para cada condição de secagem, usando o método Rosebrock e quasi-Newton com critérios de convergência de 0,001.

## 2.7. Queima das amostras

Os corpos de prova já secados pelo procedimento descrito anteriormente foram levados a um forno de resistência elétrica da EDG Equipamentos, modelo FC-2 e foram sinterizados a duas temperaturas diferentes, 900°C e 950°C, com uma taxa de aquecimento de 2°C/min. Foi calculado a retração volumétrica (RV) em porcentagem dos corpos de prova segundo a Equação 10, onde  $V_s$  é o volume antes da queima e  $V_q$  é o volume depois da queima.

$$RV = \frac{V_s - V_q}{V_q} \quad (10)$$

## 2.8. Caracterização mecânica dos corpos de prova

Os termos destas séries convergentes diminuem com um aumento de  $N$  e  $t$ . Varias aproximações e variações do modelo de difusão foram usados para prever a taxa de secagem de muitos sólidos. Porém, relativamente pequenos estudos são relacionados a materiais cerâmicos, assim sendo, foi proposto uma forma aproximada da Equação 8 quando só três termos das séries infinitas são usadas. Desta maneira, pode-se escrever:

Foi verificada a resistência à compressão dos blocos cerâmicos para alvenaria em uma máquina universal de ensaios de materiais, modelo: Instron 5582, de acordo com a norma da ABNT, NBR6461 de Junho de 1983, onde é aplicada uma pasta de cimento sobre as faces a serem comprimidas. O procedimento da compressão é feito de modo que a carga se eleva progressivamente a uma razão de aproximadamente 50N/s.

O limite de resistência a compressão (Equação 11) para cada corpo de prova, expresso em MPa, é obtido dividindo-se a carga máxima ( $F$ ), em Newton observada durante o ensaio pela média das áreas brutas das duas faces de trabalho em  $mm^2$ .

$$\sigma_f = \frac{F}{A} \quad (11)$$

## 2.9. Resistência ao choque térmico

A resistência de muitos materiais à falha provocada por choque térmico pode ser aproximada segundo um parâmetro de resistência ao choque térmico (RCT), dado pela Equação 12 [17].

$$RCT = \frac{\sigma_f \cdot \kappa}{E \cdot \alpha_1} \quad (12)$$

onde  $\sigma_f$  é a resistências a fratura,  $\kappa$  é a condutividade térmica do material,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\alpha_1$  é o coeficiente de expansão térmica linear. Para este estudo foi adotado  $\alpha_1 = 2,14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [19],  $\kappa = 0,72 \text{ W/mK}$  para tijolo comum [20]. O módulo de elasticidade de uma cerâmica varia em torno de  $7 \times 10^4$  e  $50 \times 10^4 \text{ MPa}$  [17]. Então foi adotado o limite superior por questão de segurança,  $E = 50 \times 10^4 \text{ MPa}$ , onde essas constantes não representam exatamente o material estudado pois são valores médios para cerâmica vermelha, sendo o suficiente para um estudo qualitativo.

## 2.10. Ensaios de choque térmico

Os ensaios de choque térmico foram realizados em corpos de prova de duas geometrias diferentes: tijolos vazados com 6 furos (Figura 1) e placas maciças (Figura 3).

Primeiramente se fez uma análise visual dos corpos de prova, depois foi realizado diversas fotos da superfícies dos tijolos, antes e depois do ensaio com uma máquina fotográfica de alta resolução. Os corpos de prova de ambas as dimensões citadas acima foram secados a  $110^\circ\text{C}$  e em seguida sinterizados a  $950^\circ\text{C}$  e posteriormente colocadas em uma estufa a  $110^\circ\text{C}$ . Um recipiente de capacidade 20 litros foi preenchido com água a temperatura ambiente ( $23^\circ\text{C}$ ).

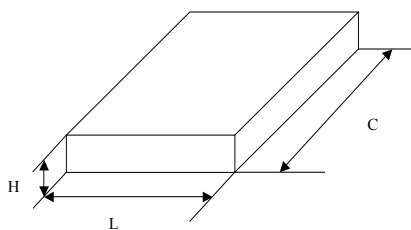


Figura 3. Ilustração do corpo de prova (placa maciça) e suas dimensões, utilizado para realização do ensaio de choque térmico.

Os corpos de prova a uma temperatura de  $110^\circ\text{C}$  eram finalmente retirados da estufa e imediatamente mergulhados na água a  $23^\circ\text{C}$ . As amostras foram divididas em três grupos de cinco, onde se variou o tempo de contato com a água de cada grupo: o

primeiro permaneceu imerso por 1s, o segundo por 5s e o terceiro por 10s. Após o choque térmico foram realizadas análises visuais com grande zoom das fotos, a fim de identificar trincas ou qualquer dano estrutural causado em alguma amostra.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1. Análise mineralógica da argila

A Figura 4 apresenta o difratograma obtido para a massa cerâmica estudada, onde pode-se verificar a presença de montmorilonita ( $d' = 14,718$ ), ilita ( $d' = 10,024$ ,  $d' = 4,989$ ), caulinita ( $d' = 7,213$ ,  $d' = 3,189$ ), quartzo ( $d' = 3,3458$ ,  $d' = 4,237$ ,  $d' = 2,457$ ) e mica ( $d' = 2,459$ ,  $d' = 3,779$ ) onde  $d'$  é a distância interplanar em angstroms. Picos secundários desses argilominerais também foram detectados.

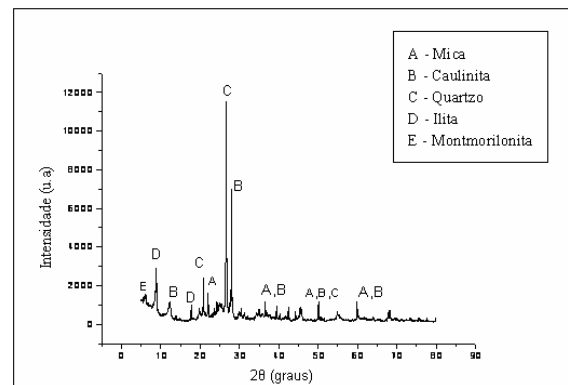


Figura 4. Difratograma de Raios X para massa cerâmica

### 3.2. Análise térmica da argila

As curvas da análise térmica diferencial e análise térmica gravimétrica estão mostradas na Figura 5 Na DTA, observa-se a existência de picos térmicos significativos. Os picos que ocorrem entre  $110$  e  $200^\circ\text{C}$ , é devido à presença de água livre e água absorvida. Entre as temperaturas de  $200^\circ\text{C}$  e  $502^\circ\text{C}$ , ocorrem bandas exotérmicas, provavelmente, devido às reações da matéria orgânica. Foram observados dois pequenos picos endotérmicos ( $366$  e  $447^\circ\text{C}$ ), os quais correspondem a presença de hidróxido de cálcio e magnésio. Um pico endotérmico é observado entre  $502$  e  $580^\circ\text{C}$ , característico da presença de hidroxilas. Um pico exotérmico pode ser observado a temperatura de  $588^\circ\text{C}$ , o qual está associado à presença da grafite. Na temperatura de  $909^\circ\text{C}$ , observou-se um pico exotérmico, e que decorre, provavelmente, devido à nucleação da mulita.

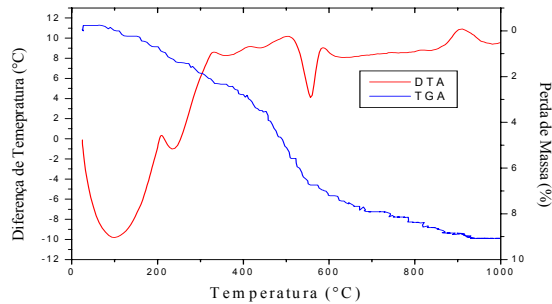


Figura 5. Análise térmica da argila

Analisando a TGA da amostra, verifica-se uma perda de massa total de 9,0%. Na faixa de temperatura compreendida entre 100 e 200°C, ocorre uma perda de massa correspondente a 0,8 %, característicos da perda de água. Na faixa de temperatura, compreendida entre 200 e 600°C, verifica-se uma queda de massa devida, provavelmente, à perda de matéria orgânica e

hidroxilas, que corresponde a uma perda de 6,4% da massa total. De 600 a 1000°C ocorre uma perda de massa de 1,8% da massa total devido a perda de matéria orgânica na forma de grafite e pequenas quantidades de carbonetos usualmente presentes nas matérias primas para cerâmica vermelha e não detectáveis na DTA.

### 3.3. Variações dimensionais

Os valores da estimativa dos coeficientes de encolhimento na Equação 3 aplicada a tijolos cerâmicos em nove experimentos são apresentados na Tabela 3. O coeficiente de correlação em todas as experiências chegam muito próximo de 1,0. As curvas de comparação entre os dados de encolhimento experimental e os previstos pela equação, para blocos vazados, são mostradas nas Figuras 6-8.

Tabela 3. Coeficientes de encolhimento volumétrico e correlação (R) para cada uma das amostras.

Amostras	1º passo de encolhimento			2º passo de encolhimento		
	$\beta_3$	$\beta_4$	R	$\beta_3$	$\beta_4$	R
CPC170	0,766500	0,232185	0,991	0,866870	0,036285	0,974
CPC270	0,722086	0,278985	0,992	0,850896	0,029589	0,925
CPC370	0,783350	0,217659	0,978	0,879036	0,037359	0,974
CPB590	0,851767	0,155523	0,944	0,891088	0,003014	0,965
CPB690	0,827444	0,186619	0,967	0,883430	0,030075	0,988
CPB790	0,810917	0,207148	0,959	0,882353	0,007818	0,956
CPA1110	0,715582	0,286431	0,993	0,867579	0,032272	0,932
CPA2110	0,761231	0,231760	0,975	0,868921	0,022536	0,883
CPA3110	0,784763	0,197888	0,956	0,869519	0,003850	0,996

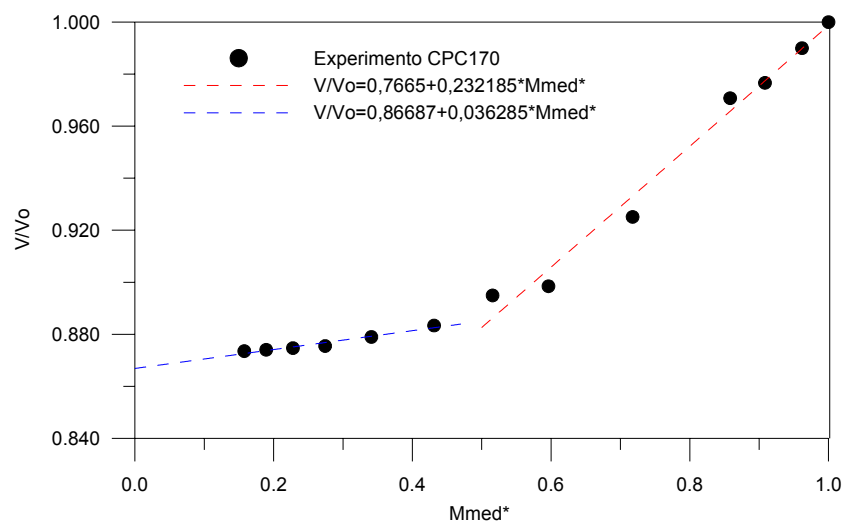


Figura 6. Comparação entre os volumes experimental e previsto de blocos cerâmicos vazados vermelhos obtidos durante a secagem em uma estufa a T=70 °C.

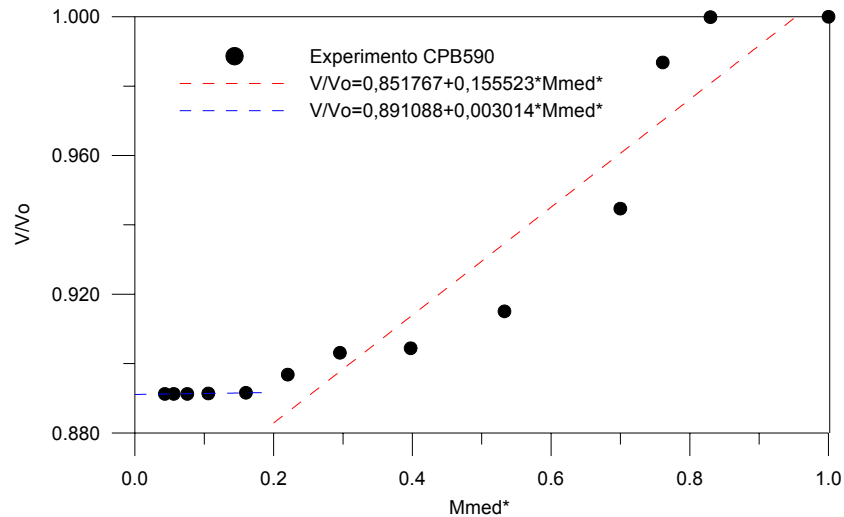


Figura 7. Comparação entre os volumes experimental e predito de blocos cerâmicos vazados vermelhos obtidos durante a secagem em uma estufa a  $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$

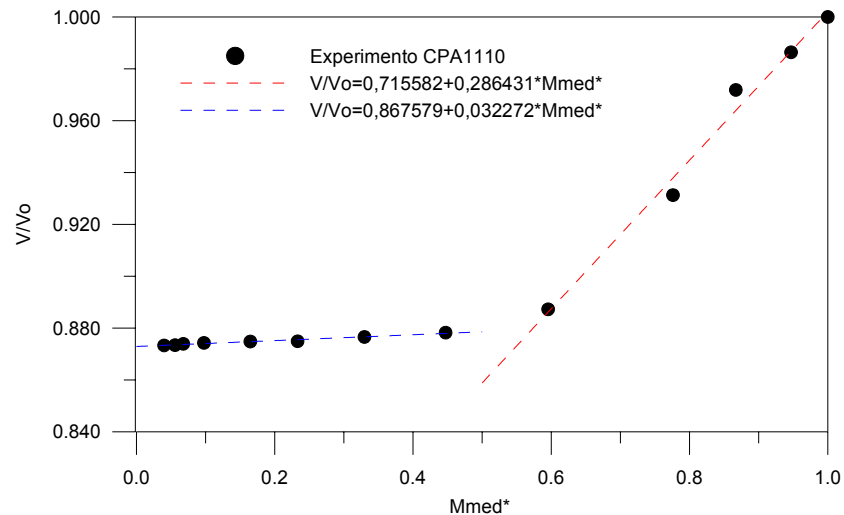


Figura 8. Comparação entre os volumes experimental e predito de tijolos cerâmicos vazados vermelhos obtidos durante a secagem em uma estufa a  $T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$

No princípio do processo de secagem, há uma grande remoção de umidade, assim, as dimensões dos sólidos mudam com velocidade alta até a velocidade de encolhimento chegar à zero. O ponto onde o encolhimento apresenta um comportamento novo depende das diferentes composições do material.

Nas Figuras 6, 7 e 8 é evidenciado a existência de dois períodos com mudanças volumétricas, similar ao que ocorre com tijolos cerâmicos maciços[10]. Este comportamento está em concordância com os resultados de outras pesquisas [4], [5], [21]. O ponto onde as curvas interceptam é chamado teor de umidade crítico [6].

### 3.4. Cinética de secagem

Para analisar os efeitos das condições do ar de secagem na redução do teor de umidade dos tijolos cerâmicos, os dados experimentais de teor de umidade para várias experiências são plotadas nas Figuras 9 e 10. Por comparação, entre os dados, pode-se ver que a temperatura do ar de secagem tem uma forte influência na taxa de secagem. Quando a temperatura aumentar, a taxa de secagem também aumenta. Isto não é muito desejável porque pode gerar elevados gradientes térmicos na parte interior dos sólidos e então induzir tensões térmica, hídrica e mecânica. Estas tensões podem produzir rachaduras, fissuras e deformações, e contribui para



reduzir a qualidade dos sólidos no fim do processo de secagem. O comportamento mecânico da argila geralmente é descrito por viscoelasticidade e

plasticidade que dependem do teor de umidade [5], [21], [22].

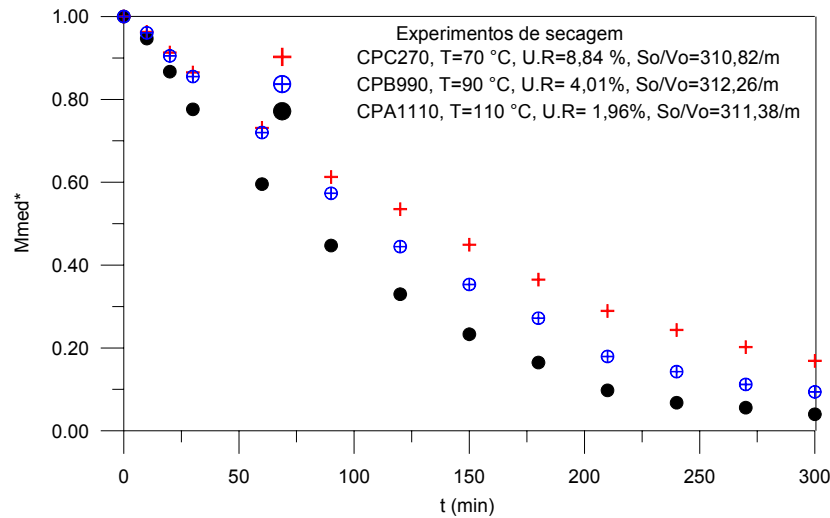


Figura 9. Efeito da temperatura de secagem e umidade relativa do ar na perda de massa (umidade) dos blocos cerâmicos vazados.

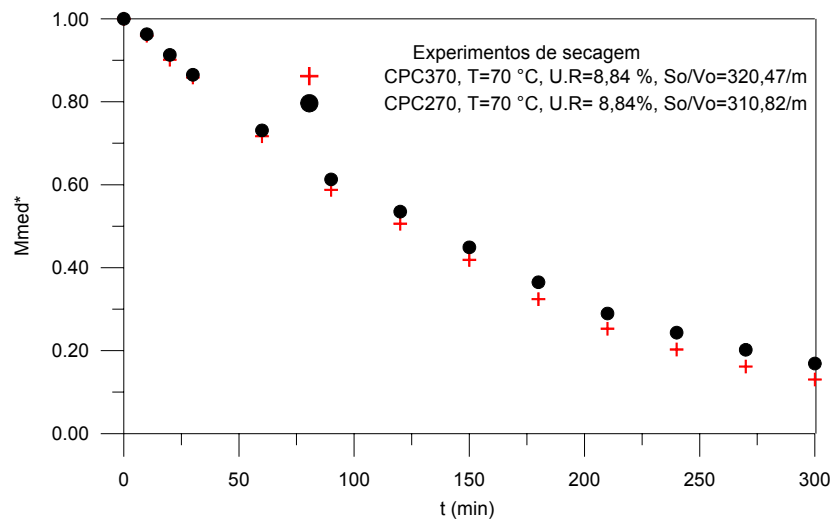


Figura 10. Efeito da relação área / volume na perda de massa (umidade) para blocos cerâmicos vazados com temperatura de secagem de 70° C e umidade relativa de 8,84%.

As formas dos tijolos também afetam a taxa de secagem (Figura 10). Para relações de área/volume mais altas tem-se a velocidade de secagem mais alta, como esperado. As regiões de umidade mais baixa e gradientes térmicos mais altos acontecem perto dos vértices do sólido [14], [15], [22]. Então, esta região é mais favorável a rachaduras e fissuras.

A técnica de regressão não-linear no software Statistica 6.0 foi usada para obter valores de  $A_i$  e  $K_i$  na Equação 9. A Tabela 4 apresenta estes valores. Como se pode ver foram obtidos excelentes ajustes para cada dado de teste, onde os valores do coeficiente de correlação foram  $R > 0,99$ . Estes

resultados podem ser usados para ajudar outros pesquisadores em estudos futuros sobre secagem de tijolos cerâmicos. Como por exemplo, nas determinações de coeficientes de transferência convectiva de massa e de difusão.

Na Figura 11 é mostrado os resultados de cinética de secagem de quatro amostras (tijolos furados) com relação a posição do tijolo dentro de uma estufa (Figura 2) com circulação forçada de ar. Nota-se que há uma direção preferencial do fluxo de ar dentro da estufa, evidenciado pela velocidade de secagem diferenciada para cada amostra. Tal

direção de fluxo se dá da direita para esquerda, já que a velocidade de secagem das amostras diminui na medida em que elas são posicionadas mais à esquerda. Tendo em vista que anteriormente foi constatado que a relação área / volume tem uma

pequena influência na cinética de secagem, é aconselhável que em trabalhos futuros sejam feitos estudos mais apurados sobre este resultado.

Tabela 4. Parâmetros da Equação 9 determinados ajustando-se a equação aos dados experimentais para cada condição de secagem.

Amostras	Parâmetros						R
	$A_1$	$K_1(s^{-1})$	$A_2$	$K_2(s^{-1})$	$A_3$	$K_3(s^{-1})$	
CPC170	0,339920	0,005975	0,339920	0,006023	0,339846	0,006018	0,9992
CPC270	0,340219	0,005731	0,340219	0,005748	0,340219	0,005747	0,9990
CPC370	0,341829	0,006354	0,341830	0,006355	0,341851	0,006354	0,9983
CPB590	0,319138	0,010107	0,319155	0,010070	0,318812	0,010042	0,9984
CPB690	0,320758	0,009138	0,320758	0,009138	0,320758	0,009150	0,9981
CPB790	0,321713	0,009130	0,321713	0,009130	0,321713	0,009160	0,9973
CPA1110	0,345733	0,009882	0,345733	0,009881	0,345734	0,009882	0,9983
CPA2110	0,344207	0,008938	0,344207	0,008938	0,344053	0,008938	0,9990
CPA3110	0,350944	0,008993	0,350944	0,008996	0,350944	0,008997	0,9979

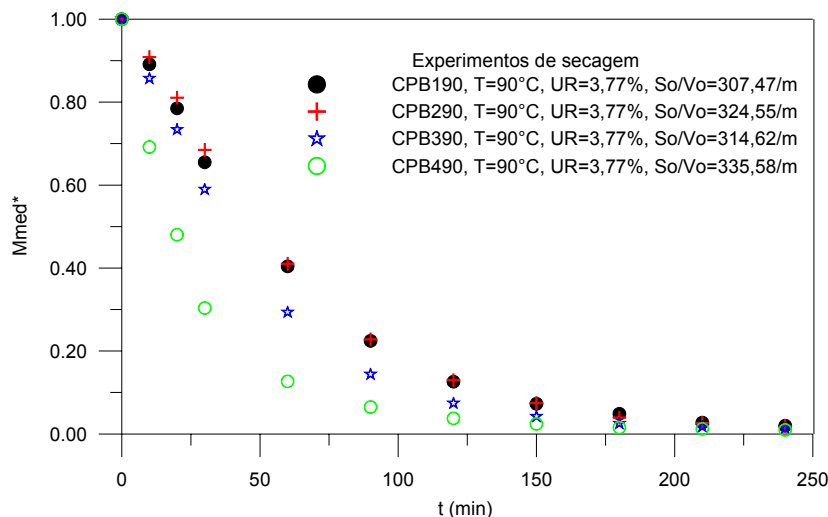


Figura 11. Efeito da posição do tijolo dentro de uma estufa com circulação de ar forçada na temperatura de secagem de 90°C e umidade relativa de 3,77%.

### 3.5. Queima das amostras

Na Tabela 5 estão evidenciados os resultados experimentais de queima dos blocos cerâmicos, onde RV é a retração volumétrica de queima. Nota-

se, que para maior temperatura de queima maior é a retração volumétrica de queima. Outros resultados relacionados à temperatura de queima são evidenciados na Tabela 6.

Tabela 5. Resultados experimentais de queima.

Temperatura de queima (°C)	Média RV (%)	Desvio padrão (%)
900	6,51	3,25
950	9,96	5,55

Tabela 6. Resultados gerais de caracterização mecânica e choque térmico.

Corpo de Prova	T <sub>SECAGEM</sub> (°C)	T <sub>QUEIMA</sub> (°C)	F (N)	A (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_f$ (MPa)	RCT (W/m)
CPA5110	110	900	5486,66	1853,790	2,960	545,706
CPA6110	110	900	3009,83	1842,436	1,634	301,204
CPA7110	110	900	4397,15	1869,317	2,352	433,710
CPA8110	110	900	8085,36	1872,589	4,318	796,101
CPA9110	110	950	2375,98	2198,151	1,081	199,295
CPA10110	110	950	4768,77	2174,550	2,193	404,342
CPA11110	110	950	6783,59	2233,534	3,037	559,988
CPA12110	110	950	7068,40	2003,610	3,528	650,458
CPA13110	110	900	5090,44	1963,647	2,592	477,973
CPA14110	110	900	6823,04	1988,141	3,432	632,765
CPA15110	110	900	5174,58	1858,394	2,784	513,392
CPA16110	110	900	9000,00	1868,412	4,817	888,176
CPA17110	110	900	3573,98	1832,197	1,951	359,659
CPC170	70	950	3339,33	1952,564	1,710	315,330
CPC270	70	950	2586,4	1962,186	1,318	243,034
CPC370	70	950	3147,48	1933,325	1,628	300,172
CPC470	70	950	2323,50	1987,966	1,169	215,499
CPC570	70	900	4999,10	1879,472	2,660	490,419
CPC670	70	900	5546,60	1040,126	5,333	983,224
CPC770	70	900	3688,15	1052,304	3,505	646,218
CPC870	70	900	2389,25	1959,539	1,219	224,812
CPC970	70	950	7306,01	2163,062	3,378	622,763
CPC1070	70	950	4916,88	2143,020	2,294	423,034
CPC1170	70	950	7729,69	2299,097	3,362	619,892
CPC1270	70	950	7324,30	2217,085	3,304	609,109
CPC1370	70	900	6075,50	1983,756	3,063	564,684
CPC1470	70	900	3270,55	2031,807	1,610	296,790
CPC1570	70	900	3133,41	1870,816	1,675	308,814
CPC1670	70	900	8000,00	1935,938	4,132	761,921

Tabela 7. Média dos Módulos de Resistência a compressão e seu respectivo desvio padrão para duas temperaturas de queima.

Temperatura de queima	900°C	950°C
Média $\sigma_f$ (MPa)	2,485	2,786
Desvio Padrão (MPa)	1,156	1,245

Tabela 8. Média dos módulos de resistência a compressão e seu respectivo desvio padrão para duas temperaturas de queima e de secagem.

Temperatura de queima	900°C		950°C	
Temperatura de secagem	70°C	110°C	70°C	110°C
Média $\sigma_f$ (MPa)	2,270	2,460	2,900	2,982
Desvio Padrão (MPa)	0,951	1,072	1,408	1,050

### 3.6. Caracterização mecânica das amostras

Na Tabela 6 estão evidenciados os resultados gerais sobre os ensaios de compressão, onde F é a

força máxima de ruptura observada durante o ensaio.

As Tabela 7 e 8 mostram os resultados da caracterização mecânica através do ensaio de compressão para os blocos cerâmicos, de acordo com as normas da ABNT, onde  $\sigma_f$  é o Módulo de Resistência a Compressão. Nota-se que em geral, na Tabela 7, o  $\sigma_f$  aumenta com o aumento da temperatura de queima; isto se deve à presença de uma estrutura mais densa, ou seja, menor porosidade.

Na Tabela 8 tem-se para a mesma temperatura de queima e temperaturas de secagem diferentes, que, o aumento da temperatura de secagem ocasiona um pequeno aumento do  $\sigma_f$ .

### 3.7. Resistência ao choque térmico das amostras

Sabe-se que, para valores de  $\sigma_f$  mais elevados, maiores serão os valores de RCT (parâmetro de resistência ao choque térmico). Na Tabela 9 nota-se que para os tijolos queimados a 950°C, a média de RCT é maior que para os tijolos queimados a 900°C, já que a 950°C o tijolo torna-se menos poroso que a 900°C, ou seja, com estrutura mais compacta, o que leva à valores maiores de  $\sigma_f$  e,

portanto de  $\sigma_f$  (módulo de ruptura a compressão) e RCT. Na Tabela 10 tem-se que para a mesma temperatura de queima, o parâmetro RCT é maior para a temperatura de secagem de 110°C do que para 70°C.

Considerou-se a condutividade e o coeficiente de expansão térmica de um tijolo cerâmico comum [20] e o coeficiente de expansão térmica de uma mistura de várias argilas [19], no entanto de acordo com a Equação 12 existe uma forte dependência do parâmetro RCT com a resistência a fratura a compressão  $\sigma_f$  (sendo diretamente proporcionais).

Os resultados são qualitativos e preliminares, no entanto é evidenciado por comparação das Tabelas 6, 7 e 9 que quanto maior  $\sigma_f$ , maior será RCT. Neste sentido, há um domínio dos valores de resistência a compressão no aumento de resistência ao choque térmico.

Apesar de os ensaios terem sido feitos cautelosamente, constatou-se um desvio padrão alto, cujo motivo para isso ainda é desconhecido, portanto é aconselhável em trabalhos futuros a realização de um número maior de ensaios, aumentando a representatividade dos resultados.

Tabela 9. Média dos parâmetros de resistência ao choque térmico e seu respectivo desvio padrão para duas temperaturas de queima de tijolos furados.

Temperatura de queima	900°C	950°C
Média RCT (W/m)	430,243	549,911
Desvio Padrão (W/m)	174,694	230,510

Tabela 10. Média dos parâmetros de resistência ao choque térmico e seu respectivo desvio padrão para duas temperaturas de queima e de secagem de tijolos furados.

Temperatura de queima	900°C		950°C	
	70°C	110°C	70°C	110°C
Média RCT (W/m)	418,604	453,521	534,610	549,854
Desvio Padrão (W/m)	175,368	197,626	259,603	193,642

### 3.8. Resultados experimentais dos ensaios de choque térmico

Como observado nas Figuras 12 – 17, a olho nú, não há presença de trincas ou fraturas que comprometam a estrutura do corpo de prova. Nesse sentido, para uma variação de temperatura de 110°C – 23°C = 87°C, fica evidenciado que neste

nível de variação de temperatura, não houve tensões internas acima do limite de resistência do material de modo a provocar danos estruturais, tais como: deformações permanentes, trincas e fraturas. Deve-se salientar que estes resultados são de natureza qualitativa.

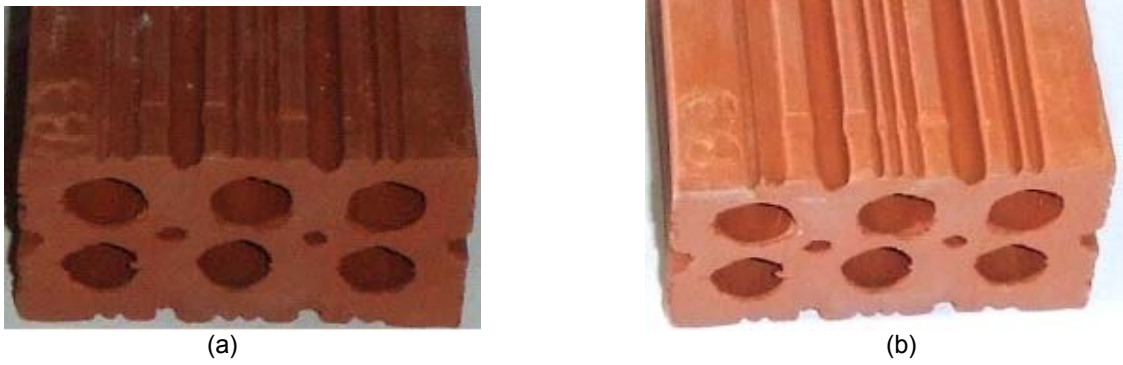


Figura 12. Comparação do corpo de prova CPB390, antes (a) e depois (b) do choque térmico, com temperatura de secagem 90°C e de queima 950°C.

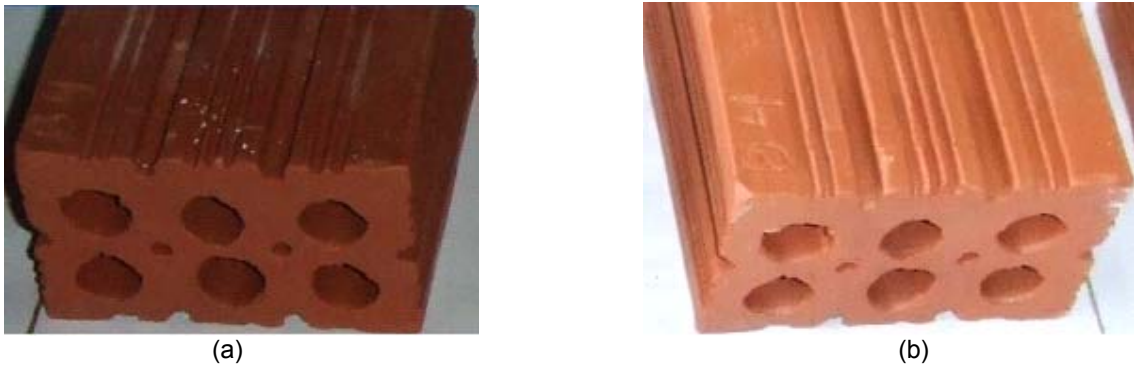


Figura 13. Comparação do corpo de prova CPB490, antes (a) e depois (b) do choque térmico, com temperatura de secagem 90°C e de queima 950°C.

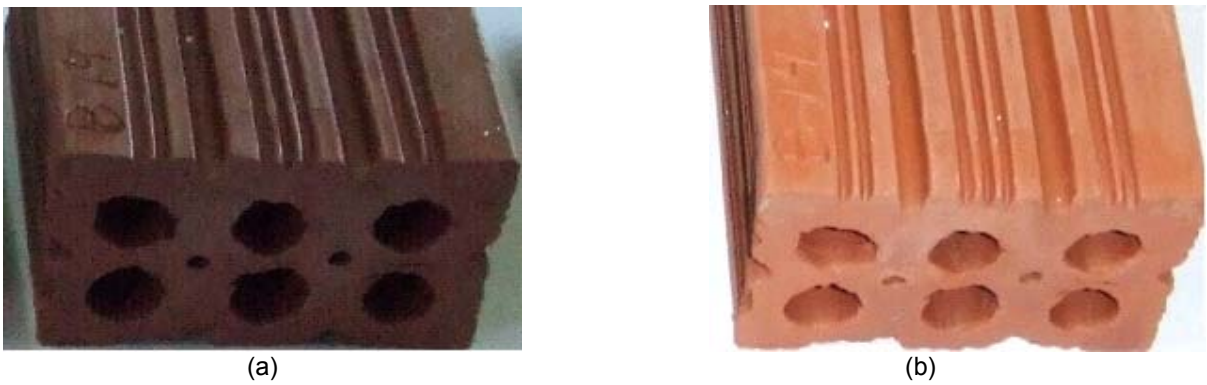


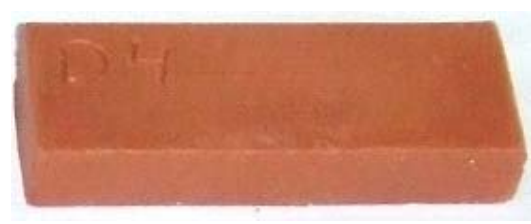
Figura 14. Comparação do corpo de prova CPB1490, antes (a) e depois (b) do choque térmico, com temperatura de secagem 90°C e de queima 950°C.



Figura 15. Comparação do corpo de prova CPD3110, antes (a) e depois (b) do choque térmico, com temperatura de secagem 90°C e de queima 950°C.



(a)



(b)

Figura 16. Comparação do corpo de prova CPD4110, antes (a) e depois (b) do choque térmico, com temperatura de secagem 90°C e de queima 950°C.



(a)



(b)

Figura 17. Comparação do corpo de prova CPD5110, antes (a) e depois (b) do choque térmico, com temperatura de secagem 90°C e de queima 950°C.

#### 4. Conclusões

Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que:

a) A forma do corpo interfere na cinética de secagem, ou seja, quanto maior a relação área/volume, mais rápida será a secagem;

b) Temperaturas do ar de secagem elevadas e umidades relativas baixas implicam numa secagem mais rápida do material. Este efeito é por sua vez, mais acentuado que os gerados pelas relações área/volume e teor de umidade inicial;

c) Quando as temperaturas e umidades relativas do ambiente de secagem são as mesmas para corpos de prova com dimensões diferentes, o teor de umidade inicial e relação área/volume dominam a cinética de secagem;

d) Maiores níveis do teor de umidade inicial implica em maiores índices de retração volumétrica;

e) Apesar de existir uma boa correlação entre os pontos experimentais e preditos pela equação proposta, a contração volumétrica deve ser mais perfeitamente definida em duas etapas. Em duas etapas evidencia-se a transição entre a maior velocidade de retração e a menor velocidade tal como a transição deve ser evitada devido a contrações não uniformes que ocorrem em tal ponto.

f) Para a secagem dos tijolos cerâmicos furados a 70°C obtiveram-se os seguintes coeficientes de encolhimento:  $0,722086 \leq \beta_3 \leq 0,783350$  e  $0,217659 \leq \beta_4 \leq 0,278985$  na primeira etapa de secagem e

$0,850896 \leq \beta_3 \leq 0,879036$  e  $0,029589 \leq \beta_4 \leq 0,037359$  na segunda etapa de secagem;

g) Para a secagem dos tijolos cerâmicos furados a 90°C obtiveram-se os seguintes coeficientes de encolhimento:  $0,810917 \leq \beta_3 \leq 0,851767$  e  $0,155523 \leq \beta_4 \leq 0,207148$  na primeira etapa de secagem e  $0,882353 \leq \beta_3 \leq 0,891088$  e  $0,003014 \leq \beta_4 \leq 0,030075$  na segunda etapa de secagem;

h) Para a secagem dos tijolos cerâmicos furados a 110°C obtiveram-se os seguintes coeficientes de encolhimento:  $0,715582 \leq \beta_3 \leq 0,784763$  e  $0,197888 \leq \beta_4 \leq 0,286431$  na primeira etapa de secagem e  $0,867579 \leq \beta_3 \leq 0,869519$  e  $0,003850 \leq \beta_4 \leq 0,032272$  na segunda etapa de secagem;

i) Em termos estatísticos, o modelo proposto, (Equação 9), se adequou muito bem aos resultados da cinética de secagem, sendo assim possível calcular numericamente em trabalhos futuros os coeficientes de transferência de massa e de difusão;

j) Da queima dos corpos de prova, tem-se que para tijolos com teores de umidade aproximadamente iguais, a retração de queima é maior para temperaturas de queima maiores.

l) Na caracterização mecânica por compressão observaram-se valores maiores de módulo de resistência à compressão ( $\sigma_f$ ) para tijolos queimados 950°C do que a 900°C, sendo estes em média, iguais a 2,79MPa e 2,49 MPa respectivamente, e para a mesma temperatura de queima e temperaturas de secagem diferentes, tem-se que, o aumento da temperatura de secagem ocasiona um pequeno aumento do  $\sigma_f$ .

m) Nota-se que para valores de  $\sigma_f$  maiores, maiores serão os valores de RCT. Para os tijolos queimados a 950°C a média de RCT é maior que para os tijolos queimados a 900°C. Estes valores são respectivamente 549,91 W/m e 430,24 W/m.

n) Qualitativamente, no ensaio de choque térmico onde a queda de temperatura foi de 110°C para 23°C, não houve dano estrutural.

### Agradecimentos

Ao CNPq, ao PIBIC/UFMG/CNPq pela bolsa de Iniciação Científica, a UAEMA / Laboratório de Materiais Maria Cláudia Silva e a UAEM / Laboratório Computacional de Térmicas e Fluidos, ambos do CCT/Universidade Federal de Campina Grande pela infra-estrutura de apoio a pesquisa.

### Referências

- [1] Medeiros, B.L. Secagem de Argila com Ar Quente Produzido por Radiação Solar, Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, Brasil, 1977.
- [2] Fricke J. A Cerâmica, Ed. Presença Ltda., Lisboa, 1981, 152p.
- [3] Reed, J. S., Principles of Ceramics Processing, 2 ed, chapter 27: Drying,, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, Wiley Interscience, 1995.
- [4] Ketelaars, A. A. J., Jomaa, W., Puiggali, J. R., Coumans, W. J. Drying Shrinkage and Stress. In: International Drying Symposium, Part A, pp. 293-303, 1992
- [5] Hasatani, M., Itaya, Y., Deformation Characteristic of Ceramics During Drying, In: International Drying Symposium, (Part A), pp. 190-199, Montreal, 1992a.
- [6] Elias, X. The manufacture ceramics materials, Barcelona-Espanha, 1995, 250p.
- [7] van der Zanden A.J.J., Schoenmakers, A.M.E., Kerkof P.J.A.M., Isothermal Vapour and Liquid Transport Inside Clay During Drying, Drying Technology, 14 (3-4), 647-676, 1996.
- [8] van der Zanden, A. J. J., Modeling and Simulting Simultaneous Liquid and Vapour Transport in Partially Sutured Porous Materials, Mathematical Modeling and Numerical Techniques in Drying Technology, Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1997.
- [9] Norton, F. H., Elements of Ceramics, Ed. Addison Wesley, Massachusetts, 350p, 1975.
- [10] Batista, V. R.; Nascimento, J.J.S, Secagem Experimental de Tijolos Cerâmicos Maciços e Vazados Incluindo Retração Volumétrica. In.: Anais do III Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2006.
- [11] Nascimento, J. J. S., Batista, V. R., Lima, A. G. B., Estudo Experimental da Secagem de Tijolos Cerâmicos Maciços e Vazados. In: Anais do 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, pp. 1 – 12, Salvador-BA, Junho, 2007.
- [12] Itaya, Y., Hasatani, M. R., R & D Needs – Drying of Ceramics, Drying Technology, 14 (6), 1301-1313, 1996.
- [13] Itaya, Y, Taniguchi, S., Hasatani, M.R., A numerical study of transient deformation and stress behavior of a clay during drying. Drying Technology, 15 (1) 1-21, 1997
- [14] Nascimento, J. J. S., Belo, F. A., Lima, A. G. B., Simultaneous Mass Transport and Shrinkage Drying of Solid Parallelepiped: a Numerical Study, In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Campinas-SP, 2001a.
- [15] Nascimento, J. J. S., Belo, F. A., Lima, A. G. B., Simultaneous Moisture Content Transport and Shrinkage During Drying of Parallelepiped Solids. In: Interamerican Drying Conference, v. 1, pp. 331-359, Boca del Rio, Vera Cruz, Mexico, 2001b.
- [16] Nascimento, J. J. S., Santana, L. N. L., Neves, G. A., Santana, E. W. F., Belo, F. A., Batista, V. R., Experimental Drying of Ceramic Bricks Including Volumetric Retraction. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, v. 1. pp. 1-10, Ouro Preto - MG, 2005.
- [17] Callister, W.D. J. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, 5ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- [18] Lima, A.G.B., Diffusion Phenomenon in Prolate Spheroidal Solids. Case Studied: Drying of Banana, Ph. D. Thesis, State University of Campinas, Campinas, Brazil, 1999. (In Portuguese).
- [19] Marino, L. F. B.; Boschi, A.O., A Expansão Térmica de Materiais Cerâmicos Parte III: Efeito da Adição de Calcita, 1999. Disponível em [http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v03n46/v3n46\\_3.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v03n46/v3n46_3.pdf). Acesso em 15 de Fevereiro de 2007.

- [20] Rohsenow, W. M.; Hartnett, J. P. ; CHO, Y. I. Handbook of Heat Transfer, 3th edition, Editora MCGraw – Hill, 1998.
- [21] Hasatani, M., Itaya, Y., Effect of Drying Process on Quality Control in Ceramic Production. In: International Drying Symposium, (Part B), pp. 1181-1198, Montreal, 1992
- [22] Hasatani, M., Itaya, Y., Modeling of Strain-Stress Behavior for Advanced Drying. In: International Drying Symposium, pp. 27-39, Krakow, 1996.