

**Secagem de tijolos cerâmicos argilosos industriais: uma investigação teórica usando
modelos concentrados**

**Drying of industrial clay ceramic bricks: a theoretical investigation using lumped
models**

**Secado de ladrillos cerámicos arcillos industriales: una investigación teórica con
modelos concentrados**

Recebido: 10/11/2020 | Revisado: 15/11/2020 | Aceito: 16/11/2020 | Publicado: 21/11/2020

Lucas Pereira Castanheira Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0594-2297>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: lucaspereira.cn@hotmail.com

Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7187-419X>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: katherine.b.moura@gmail.com

Elisiane Santana de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3004-8841>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: limaelisianelima@hotmail.com

Hortência Luma Fernandes Magalhães

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7849-2792>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: hortencia.luma@gmail.com

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-2691>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [wan_magno@hotmail.com](mailto:wanderson_magno@hotmail.com)

Ricardo Soares Gomez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4387-4600>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: ricardosoaresgomez@gmail.com

Túlio Rafael Nascimento Porto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-4306>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: trnporto@gmail.com

Antonio Gilson Barbosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-1872>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: antonio.gilson@ufcg.edu.br

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo teórico da transferência de calor e massa durante a secagem de tijolos cerâmicos industriais em estufa. Foram propostos modelos matemáticos para descrever as cinéticas de secagem e aquecimento do tijolo em função do tempo de processo, considerando a existência das áreas superficiais interna e a externa e variações dimensionais do tijolo. Foram propostos modelos empíricos para prever o comportamento do teor de umidade, temperatura superficial, volume e áreas superficiais interna e externa do produto. O estudo foi conduzido em diferentes condições operacionais do ar de secagem (50 a 100°C). Toda a modelagem foi ajustada a dados experimentais do teor de umidade médio, temperatura na superfície e dimensões médias do tijolo durante a secagem, em cada condição experimental, obtendo-se um bom ajuste e elevado coeficiente de determinação, evidenciando sua confiabilidade para ser usada na predição do problema físico. Da comparação, estimou-se o volume, as áreas superficiais interna e externa e os parâmetros de transferência de calor e de massa do tijolo.

Palavras-chave: Secagem; Volume; Área superficial; Tijolos cerâmicos; Estimação de parâmetros.

Abstract

This work presents a theoretical study of the heat and mass transfer during the drying of industrial ceramic bricks in an oven. Mathematical models have been proposed to describe the drying and heating kinetics of the brick as a function of the process time, considering the existence of the internal and external surface areas and dimensional variations of the brick. Empirical models have been proposed to predict the behavior of moisture content, surface temperature, volume and internal and external surface areas of the product. The study was conducted under different operating conditions of the drying-air (50 to 100°C). The entire

modeling was fitted to experimental data of the average moisture content, temperature on the surface and average dimensions of the brick during drying, in each experimental condition, obtaining a good fit and high coefficient of determination, showing its reliability to be used in the prediction of the physical problem. From the comparison, the volume, the internal and external surface areas and the heat and mass transfer parameters of the brick were estimated.

Keywords: Drying; Volume; Surface area; Ceramic bricks; Parameters estimation.

Resumen

Este trabajo presenta un estudio teórico de la transferencia de calor y masa durante el secado de ladrillos cerámicos industriales en un horno. Se han propuesto modelos matemáticos para describir la cinética de secado y calentamiento del ladrillo en función del tiempo de proceso, considerando la existencia de las superficies internas y externas y las variaciones dimensionales del ladrillo. Se han propuesto modelos empíricos para predecir el comportamiento del contenido de humedad, la temperatura superficial, el volumen y las áreas superficiales internas y externas del producto. El estudio se llevó a cabo en diferentes condiciones de funcionamiento del aire de secado (50 a 100°C). Todo el modelado se ajustó a los datos experimentales del contenido promedio de humedad, temperatura en la superficie y dimensiones promedio del ladrillo durante el secado, en cada condición experimental, obteniendo un buen ajuste y alto coeficiente de determinación, mostrando su confiabilidad para ser utilizado en la predicción del problema físico. A partir de la comparación, se estimaron el volumen, las áreas de las superficies internas y externas y los parámetros de transferencia de calor y masa del ladrillo.

Palabras clave: Secado; Volumen; Áreas superficiales; Ladrillos cerámicos; Estimación de parámetros.

1. Introdução

A indústria de construção civil no Brasil está fortemente relacionada ao uso da cerâmica vermelha. Esse segmento é responsável pela produção de tijolos furados e maciços, lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos, produtos que são a base da construção civil. Devido a uma grande variedade de produtos, é importante que os técnicos e engenheiros envolvidos na produção tenham total controle do processo, para que, assim, seja possível investir cada vez mais no setor.

Do ponto de vista econômico, a indústria cerâmica brasileira destaca-se pela quantidade de atividades incorporadas ao seu ciclo de produção e do ponto de vista social, pela capacidade de absorção da mão-de-obra. De acordo com a ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica, 2020), o setor apresenta um faturamento anual de 18 bilhões de reais, tendo aproximadamente 6903 fábricas de produtos cerâmicos.

O processo de fabricação de produtos cerâmicos compreende as seguintes fases: exploração das jazidas, tratamento prévio da matéria prima, homogeneização (mistura com água para dar plasticidade à matéria prima), secagem e a queima. Dentre as fases citadas, a secagem é uma das mais importantes etapas de produção. Trata-se de um processo termodinâmico, no qual a água, que foi adicionada anteriormente na etapa de homogeneização, é retirada do produto por evaporação (Lima, 2017). O objetivo desta fase é a redução do teor de umidade dos produtos. Trata-se de um processo que demanda um alto consumo de energia, sendo responsável por grande parte dos custos de produção de uma peça cerâmica.

A secagem deve ser feita com um rígido controle do processo, pois, se realizada de maneira incorreta danos estruturais como, deformações, trincas e empenamentos podem ocorrer e, conseqüentemente, uma grande perda de produtos (Heydari et al., 2018). Em geral, os desperdícios que hoje ocorrem na indústria da cerâmica vermelha, são da ordem de 30% (Coelho, 2009). Assim sendo, visando melhorar a qualidade do produto final e determinar os melhores parâmetros de processo e seus efeitos sobre o produto, diversos trabalhos teóricos e experimentais são citados na literatura (Avelino, 2008; Macedo et al., 2008; Silva, 2009; Silva et al., 2009; Silva et al., 2011; Almeida et al., 2013; Tavares et al., 2014; Almeida et al., 2016; Brito et al., 2017; Araújo et al., 2019).

A modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda a simulação de sistemas reais a fim de prever o comportamento dos mesmos, ou seja, consiste na tentativa de se descrever matematicamente um fenômeno físico (Lima, 2017; Silva, 2018). Através de uma modelagem matemática adequada é possível avaliar a perda de umidade dos produtos cerâmicos e sua temperatura de forma apropriada. Para isto, precisa-se obter a solução das equações governantes que compõem o modelo e a criação de códigos computacionais que simulem o processo de aquecimento, retirada de água, e outros efeitos decorrentes destes processos visando à redução de perdas e custos de processo.

Com a solução das equações governantes encontradas, é preciso realizar uma comparação com dados experimentais, para verificar justamente a coerência dos resultados obtidos, e se o modelo utilizado foi satisfatório, o que evidencia a importância de estudos

experimentais. Através dessa comparação é pertinente a estimação de parâmetros de processo como, por exemplos, os coeficientes de transferência de calor e de massa convectivos, e as difusividades térmica e de massa do material. A ideia é auxiliar no controle do processo, minimizar o consumo de energia, projetar adequadamente os sistemas de secagem e obter um produto de ótima qualidade. Portanto, conhecer os mecanismos da transferência de umidade e calor no produto torna-se de fundamental importância para a indústria cerâmica.

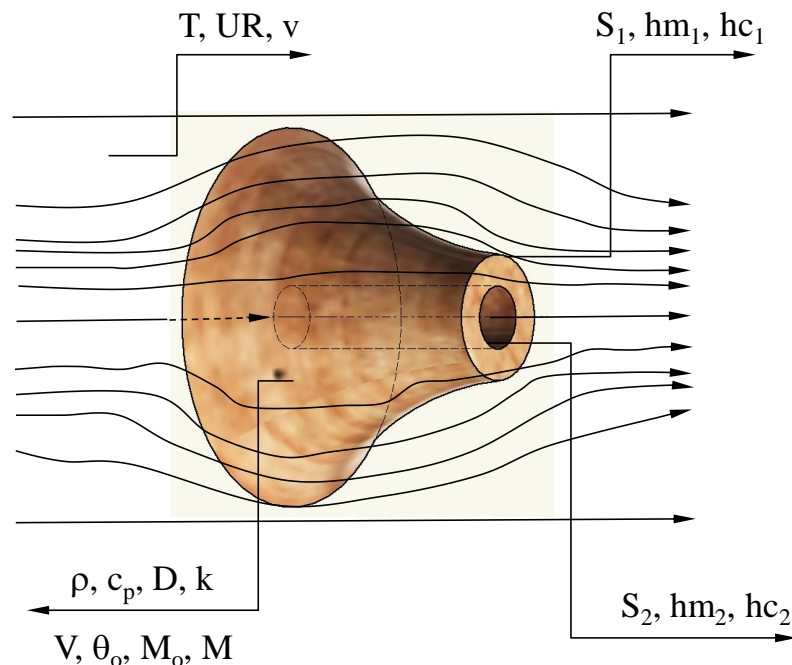
Diante disto, este trabalho tem como objetivo estudar a secagem de tijolos cerâmicos industriais usando modelos concentrados fenomenológicos que levam em consideração as variações dimensionais do produto durante o processo.

2. Metodologia

Modelagem matemática

O problema físico a ser estudado é o processo de secagem (transferência de calor e massa) de sólidos porosos vazados e úmidos, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Esquema representativo de um sólido homogêneo vazado e de forma arbitrária.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na modelagem matemática foram consideradas as seguintes hipóteses:

- O tijolo é constituído de água na fase líquida e matéria sólida;
- Propriedades termofísicas constantes;
- A água migra do interior do tijolo na forma líquida e evapora na superfície;
- Na superfície do sólido tem-se convecção térmica, evaporação e aquecimento de vapor produzido;
- As dimensões do sólido variam com o tempo;
- Geração de calor e massa desprezíveis.

a) Análise da transferência de massa

A complexidade do processo de secagem depende, entre outros parâmetros, da análise levada em consideração. Os modelos de análise distribuída expressam as taxas de transferência de calor e massa como uma função da posição no interior da peça e do tempo de secagem, levando em consideração as resistências externa e interna aos fluxos de calor e massa. Já os modelos concentrados expressam as mesmas taxas somente em função do tempo de processo e desprezando a resistência interna existente para as transferências de calor e massa (Silva, 2009).

Assumindo uma condição convectiva e uma análise concentrada, o seguinte modelo do balanço de massa pode ser dado:

$$\bar{V} \frac{d\bar{M}}{dt} = -h_{m1} \bar{S}_1 (\bar{M} - \bar{M}_e) - h_{m2} \bar{S}_2 (\bar{M} - \bar{M}_e) + \dot{M} \bar{V} \quad (1)$$

onde \bar{V} representa o volume médio do sólido, sendo \bar{S}_1 a área externa média do tijolo, \bar{S}_2 é a área interna média do tijolo (furos), h_{m1} é o coeficiente de transferência de massa convectiva externo e h_{m2} é o coeficiente de transferência de massa convectiva interno, M é o teor de umidade, M_e é o teor de umidade de equilíbrio do sólido, e t é o tempo.

Usando a condição inicial $M(t=0)=M_0$, separando-se as variáveis da Equação (1) e integrando-a desde a condição inicial, tem-se como resultado:

$$\frac{(\bar{M} - \bar{M}_e) - \frac{M\bar{V}}{h_{m1}\bar{S}_1 + h_{m2}\bar{S}_2}}{(\bar{M}_0 - \bar{M}_e) - \frac{M\bar{V}}{h_{m1}\bar{S}_1 + h_{m2}\bar{S}_2}} = \text{Exp} \left[\left(\frac{-h_{m1}\bar{S}_1 - h_{m2}\bar{S}_2}{\bar{V}} \right) t \right] \quad (2)$$

Organizando a Equação 2, pode-se escrever:

$$(\bar{M} - \bar{M}_e) - \frac{M\bar{V}}{h_{m1}\bar{S}_1 + h_{m2}\bar{S}_2} = \left[(\bar{M}_0 - \bar{M}_e) - \frac{M\bar{V}}{h_{m1}\bar{S}_1 + h_{m2}\bar{S}_2} \right] \text{Exp} \left[\left(\frac{-h_{m1}\bar{S}_1 - h_{m2}\bar{S}_2}{\bar{V}} \right) t \right] \quad (3)$$

ou ainda,

$$\bar{M} - \bar{M}_e = \left[(\bar{M}_0 - \bar{M}_e) - \frac{M\bar{V}}{h_{m1}\bar{S}_1 + h_{m2}\bar{S}_2} \right] \text{Exp} \left[\left(\frac{-h_{m1}\bar{S}_1 - h_{m2}\bar{S}_2}{\bar{V}} \right) t \right] + \frac{M\bar{V}}{h_{m1}\bar{S}_1 + h_{m2}\bar{S}_2} \quad (4)$$

Por não haver reações que possam gerar água no interior do produto, considera-se $\dot{M} = 0$. Assim, a equação encontrada, que define a transferência de massa, considerando a variação dimensional durante o processo, se resume a forma:

$$\bar{M} = \left[(\bar{M}_0 - \bar{M}_e) \text{Exp} \left[\left(\frac{-h_{m1}\bar{S}_1 - h_{m2}\bar{S}_2}{\bar{V}} \right) t \right] \right] + \bar{M}_e \quad (5)$$

b) Análise da transferência de calor

De modo análogo à transferência de massa, para a análise da transferência de calor, ao considerar o fluxo de calor por unidade de área constante, têm-se o seguinte balanço de energia:

$$\rho\bar{V}c_p \frac{d\bar{\Theta}}{dt} = h_{c1}\bar{S}_1(\bar{\Theta}_\infty - \bar{\Theta}) + h_{c2}\bar{S}_2(\bar{\Theta}_\infty - \bar{\Theta}) + \dot{q}\bar{V} \quad (6)$$

onde, ρ e c_p representam a densidade e o calor específico do sólido, respectivamente; $\bar{\Theta}_\infty$ é a temperatura do meio externo (temperatura de equilíbrio); $\bar{\Theta}_0$ é a temperatura inicial do sólido; $\bar{\Theta}$ é a temperatura instantânea do sólido (em qualquer tempo de processo); h_{c1} e h_{c2} são os coeficientes de transferência de calor convectivo externo e interno, respectivamente.

Assim, após simplificação pode-se escrever:

$$\frac{d\bar{\Theta}}{dt} = \left(\frac{h_{c1}\bar{S}_1 + h_{c2}\bar{S}_2}{\rho\bar{V}c_p} \right) (\bar{\Theta}_\infty - \bar{\Theta}) + \frac{\dot{q}}{\rho c_p} \quad (7)$$

Desde que não há reações químicas que possam gerar calor no interior do produto, considera-se $\dot{q} = 0$. Assim, usando a condição inicial $\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_0$ em $t = 0$, separando-se as variáveis da Equação (7) e integrando-a desde a condição inicial, tem-se como resultado:

$$\frac{\bar{\theta}_{\infty} - \bar{\theta}}{\bar{\theta}_{\infty} - \bar{\theta}_0} = \text{Exp} \left[\left(\frac{-h_{c1} \bar{S}_1 - h_{c2} \bar{S}_2}{\rho V c_p} \right) t \right] \quad (8)$$

Ainda, organizando a Equação 8, obtém-se:

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_{\infty} - (\bar{\theta}_{\infty} - \bar{\theta}_0) \text{Exp} \left[\left(\frac{-h_{c1} \bar{S}_1 - h_{c2} \bar{S}_2}{\rho V c_p} \right) t \right] \quad (9)$$

Aplicação a tijolos cerâmicos industriais

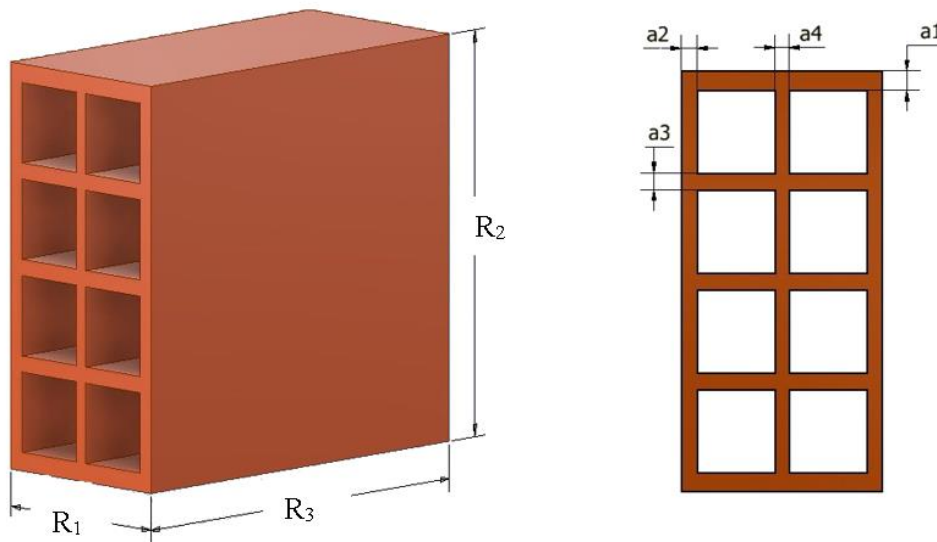
Nesta pesquisa, toda a modelagem matemática foi aplicada para descrever a secagem de tijolos em estufa, baseando-se no trabalho de SILVA (2009), que estudou, de forma experimental, a secagem de tijolos cerâmicos industriais (tijolos de 8 furos) em diferentes condições operacionais.

3) *Os procedimentos experimentais utilizados como base*

Segundo Silva (2009), os materiais utilizados para secagem em estufa foram tijolos cerâmicos vazados com 8 furos retangulares e de forma paralelepípedica. Primeiramente, foram medidas as dimensões, a massa, a temperatura do tijolo, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar. Em seguida, as amostras foram levadas para o local da secagem, ou seja, para o interior da estufa com circulação de ar forçada. Nesse processo, a temperatura interna da estufa foi fixada conforme desejado (50, 60, 70, 80, 90 e 100°C) através do controlador de temperatura. Em intervalos pré-definidos a amostra foi retirada da estufa, possibilitando a medição da sua temperatura, massa e dimensões.

Na Figura 2 ilustra-se o modelo geométrico do corpo de prova utilizado, bem como as posições onde foram obtidas as medidas do comprimento (R_1), da largura (R_2), da altura (R_3), e das dimensões que caracterizam os furos dos tijolos, a_1 , a_2 , a_3 e a_4 . A Tabela 1 resume, para cada condição experimental, os dados do produto e do ar. Na Tabela 2 apresentam-se, para cada condição operacional, as dimensões, o volume e a área superficial da amostra, antes do início do processo de secagem.

Figura 2. Tijolo vazado com as dimensões em cotas.



Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 1. Parâmetros experimentais do ar e tijolo para cada teste de secagem.

Ar			Tijolo					t _f (h)
T (°C)	UR (%)	v(m/s)	M _o (b.s)	M _f (b.s)	M _e (b.s)	θ _o (°C)	θ _f (°C)	
50	80	0,05	0,13969	0,0	0,00011	20,6	41,0	18,5
60	79	0,06	0,14795	0,0	0,00268	20,5	50,2	13,7
70	69	0,07	0,15414	0,0	0,00076	26,0	64,5	17,8
80	66	0,08	0,15248	0,0	0,00039	21,4	69,2	15,0
90	68	0,09	0,15921	0,0	0,00151	21,0	78,5	11,5
100	52	0,10	0,16903	0,0	0,00038	26,1	93,2	12,3

Fonte : Silva (2009).

Tabela 2. Dimensões do tijolo antes do início do processo de secagem.

T (°C)	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a ₃ (mm)	a ₄ (mm)	V _o (mm ³)	S _o (mm ²)
50	93,36	197,00	200,00	9,04	7,10	7,88	6,30	1415643,80	371100,44
60	92,75	195,00	200,00	8,34	7,32	7,11	6,45	1367269,30	369020,69
70	93,16	197,00	203,00	8,54	9,87	7,99	6,96	1621580,85	1621580,85
80	92,76	197,00	201,00	8,16	7,20	7,84	6,66	1408074,95	372144,46
90	93,10	197,00	201,00	8,88	7,95	6,57	6,78	1428426,08	372330,87
100	92,80	198,00	202,00	11,70	9,41	8,74	8,00	1734026,10	361166,49

Fonte : Silva (2009).

Durante o processo, as medições foram feitas de 10 em 10 minutos até que a massa tivesse variação mínima. Em seguida, as medições passaram ser de 30 em 30 minutos, sendo as próximas medições feitas de 60 em 60 minutos até a massa permanecer constante. Logo após, a amostra ter atingido a condição de equilíbrio gravimétrico, a mesma foi submetida a uma secagem em estufa por 24 horas para obtenção da massa de equilíbrio, na mesma temperatura de secagem, e, em seguida, por mais 24 horas na temperatura de 100°C para obter-se a massa do produto seco.

Silva (2009) também realizou um ajuste dos dados experimentais relacionados à transferência de massa (teor de umidade) durante o processo e propôs uma equação exponencial a 2 termos e 4 parâmetros. A equação tem a forma:

$$\bar{M} = \bar{a}_1 \exp(k_1 t) + \bar{a}_2 \exp(k_2 t) \quad (10)$$

onde t é dado em minutos. A estimativa dos parâmetros c1, c2, k1 e k2 foi realizada utilizando o método numérico de Rosembrock e Quase-Newton empregando o Software Statística®, com critério de convergência de 0,001. Após o ajuste, Silva (2009) apresentou os seguintes parâmetros contidos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros da Equação 10 obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.

T (°C)	Parâmetro				R	Proporção da variância
	\bar{a}_1	k_1 (mm ⁻¹)	\bar{a}_2	k_2 (mm ⁻¹)		
50	0,576178	-0,004711	0,482232	-0,004711	0,997676745	0,995358888
60	0,547740	-0,005945	0,513349	-0,005945	0,997968284	0,995940696
70	0,00000	-0,006781	1,045050	-0,0070948	0,999112861	0,998226509
80	0,535201	-0,009190	0,527668	-0,009190	0,998502641	0,997007523
90	10,63554	-0,014298	-9,613313	-0,015018	0,998876724	0,997754709
100	4,875507	-0,008383	-3,827964	-0,007881	0,998297496	0,996597890

Fonte : Silva (2009).

Em complemento a esse estudo experimental, foi feito, nesta pesquisa, o ajuste de uma equação com 4 parâmetros aos dados experimentais de temperatura no vértice do tijolo. A equação tem a forma:

$$\theta = \bar{b}_1 + \bar{b}_2 \text{Log}_{10}(t^{\bar{b}_3} + \bar{b}_3) \quad (11)$$

onde t é dado em minutos. A estimativa dos parâmetros \bar{b}_1 , \bar{b}_2 , k_3 e \bar{b}_3 foi realizada utilizando o método numérico de Quase-Newton empregando o Software Statistica[®], com critério de convergência de 0,0001, e realizando 500 iterações.

b) Análise geométrica e dimensional

Para verificar o comportamento do volume e a área superficial do tijolo ao longo do processo fez-se uso da Tabela 2 e de diversos dados dimensionais coletados por Silva (2009). Assim, foram feitos alguns cálculos auxiliares, de onde determinou-se os parâmetros geométricos como segue.

- Volume do tijolo

O cálculo do volume do tijolo (V) em cada tempo de medição foi feito com base no valor das suas dimensões, comprimento (R_1), largura (R_2), altura (R_3) e das dimensões que caracterizam os furos do tijolo, a_1 , a_2 , a_3 e a_4 , usando as seguintes equações:

$$V_f = a_v a_H R_3 \quad (\text{volume dos furos do tijolo}) \quad (12)$$

$$V = (R_1 R_2 R_3) - (8V_f) \quad (\text{volume total do tijolo}) \quad (13)$$

onde:

$$a_v = (R_2 - 2a_1 - 3a_3)/4 \quad (\text{altura de um furo}) \quad (14)$$

$$a_H = (R_1 - 2a_2 - a_4)/2 \quad (\text{largura de um furo}) \quad (15)$$

- Área superficial total do tijolo

O cálculo das áreas superficiais 1 (externa) e 2 (interna) do tijolo em cada tempo de medição foi feito com base no valor das suas dimensões, ou seja, com base nas mesmas variáveis usadas no cálculo do volume (R_1 , R_2 , R_3 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_v e a_H). *As equações usadas foram as seguintes:*

$$S_1 = (2R_1 R_3) + (2R_2 R_3) + 2[(R_1 R_2) - (8a_H a_v)] \quad (16)$$

$$S_2 = 8[(2a_H R_3) + (2a_v R_3)] \quad (17)$$

Com o auxílio das Equações 12 a 17, dos dados dimensionais reportados por Silva (2009) e com o uso do programa Microsoft Excel, foi possível encontrar os valores de V , S_1 e S_2 para cada tempo de processo, em diferentes temperaturas.

Com os pontos experimentais determinados foi possível ajustá-los à um modelo matemático que descreve a variação volumétrica e as áreas superficiais externa e interna do tijolo durante o processo de secagem, utilizando o software Statística® (método numérico Simplex e critério de convergência de 0,00001). Para isto, foi proposto um modelo polinomial do terceiro grau, tanto para o volume como para as áreas superficiais interna e externa, da seguinte forma :

$$V(t) = \bar{c}_3 t^3 + \bar{c}_2 t^2 + \bar{c}_3 t + \bar{c}_4 \quad (18)$$

$$S_1(t) = \bar{d}_1 t^3 + \bar{d}_2 t^2 + \bar{d}_3 t + \bar{d}_4 \quad (19)$$

$$S_2(t) = \bar{e}_1 t^3 + \bar{e}_2 t^2 + \bar{e}_3 t + \bar{e}_4 \quad (20)$$

Com os valores de S_1 , S_2 e V em cada instante de tempo de processo, foram obtidos seus valores médios como segue :

$$\bar{S}_1 = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} S_1(t) dt \quad (21)$$

$$\bar{S}_2 = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} S_2(t) dt \quad (22)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} V(t) dt \quad (23)$$

onde t_f é o tempo total de processo, como estabelecido na Tabela 1.

As Equações 5 e 9 foram ajustadas aos dados experimentais do teor de umidade (Equação 10) e temperatura na superfície (vértice) (Equação 11) do tijolo cerâmico, usando o software Statística® (método numérico de Quase-Newton e critério de convergência de 0,0001). Do ajuste, foi possível estimar uma relação entre os coeficientes de transferência de massa (hm_1 e hm_2) e calor (hc_1 e hc_2) convectivos. Para isto considerou-se para o tijolo $\rho \times c_p = 3213139,2 \text{ J/m}^3\text{K}$.

3. Resultados e Discussões

Análise geométrica

A Tabela 4 resume os parâmetros obtidos para a Equação 18, a Tabela 5 resume os parâmetros obtidos para a Equação 19 e a Tabela 6 resume os parâmetros obtidos para a Equação 20, após ajustes aos dados experimentais reportados por Silva (2009).

Tabela 4. Parâmetros de ajuste da Equação 18 que descreve o comportamento volumétrico da amostra (software Statística®).

T (°C)	Parâmetro				R	Proporção da variância
	\bar{c}_1 (m ³ /min ³)	\bar{c}_2 (m ³ /min ²)	\bar{c}_3 (m ³ /min)	\bar{c}_4 (m ³)		
50	-0,000862	1,76499	-1099,66	1381400	0,98227288	96,486%
60	-0,001538	2,46177	-1213,49	1356500	0,98812668	97,639%
70	-0,000678	1,36975	-911,113	1546700	0,94004504	88,368%
80	-0,001273	2,02475	-977,457	1374700	0,94563064	89,422%
90	-0,003695	4,40681	-1596,91	1392300	0,9535488	90,926%
100	-0,003480	5,278373	-2066,011	1551571	0,81039933	65,675%

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 5. Parâmetros de ajuste da Equação 19 que descreve o comportamento da área superficial externa da amostra (software Statística®).

T (°C)	Parâmetro				R	Proporção da variância
	\bar{d}_1 (m ² /min ³)	\bar{d}_2 (m ² /min ²)	\bar{d}_3 (m ² /min)	\bar{d}_4 (m ²)		
50	-0,000048	0,097997	-61,522595	129783,285014	0,99146119	98,299%
60	-0,000107	0,159658	-73,206515	128454,157340	0,98855071	97,723%
70	-0,000060	0,112524	-62,893982	131665,175207	0,94881258	90,025%
80	-0,000088	0,137408	-64,035617	129195,586267	0,94268275	88,865%
90	-0,000222	0,268086	-96,156082	130249,211837	0,96253871	92,648%
100	-0,000096	0,144583	-60,529235	128889,577924	0,7825525	61,239%

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 6. Parâmetros de ajuste da Equação 20 que descreve o comportamento da área superficial interna da amostra (software Statística®).

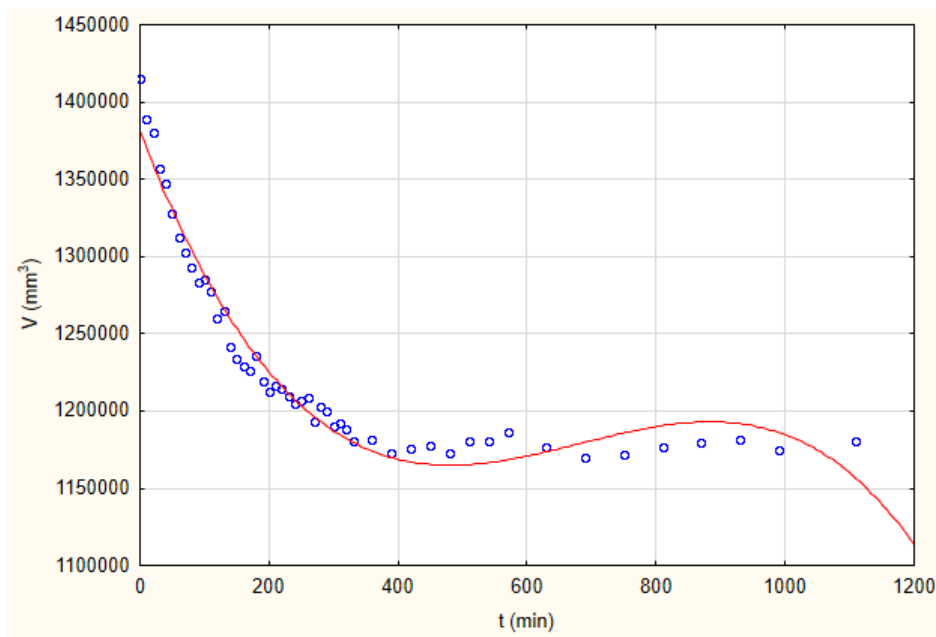
T (°C)	Parâmetro				R	Proporção da variância
	\bar{e}_1 (m ² /min ³)	\bar{e}_2 (m ² /min ²)	\bar{e}_3 (m ² /min)	\bar{e}_4 (m ²)		
50	-0,000078	0,161824	-102,148825	242137,372411	0,9892344	97,858%
60	-0,000208	0,296962	-129,082705	240237,886296	0,97510611	95,083%
70	-0,000140	0,254160	-129,996120	235136,250230	0,91719385	84,124%
80	-0,000179	0,278252	-126,345695	241489,775513	0,92607765	85,762%
90	-0,000406	0,492938	-175,094501	243322,720848	0,95039954	90,326%
100	-0,000135	0,184707	-75,166797	226660,100612	0,69988331	48,984%

Fonte: Dados da pesquisa.

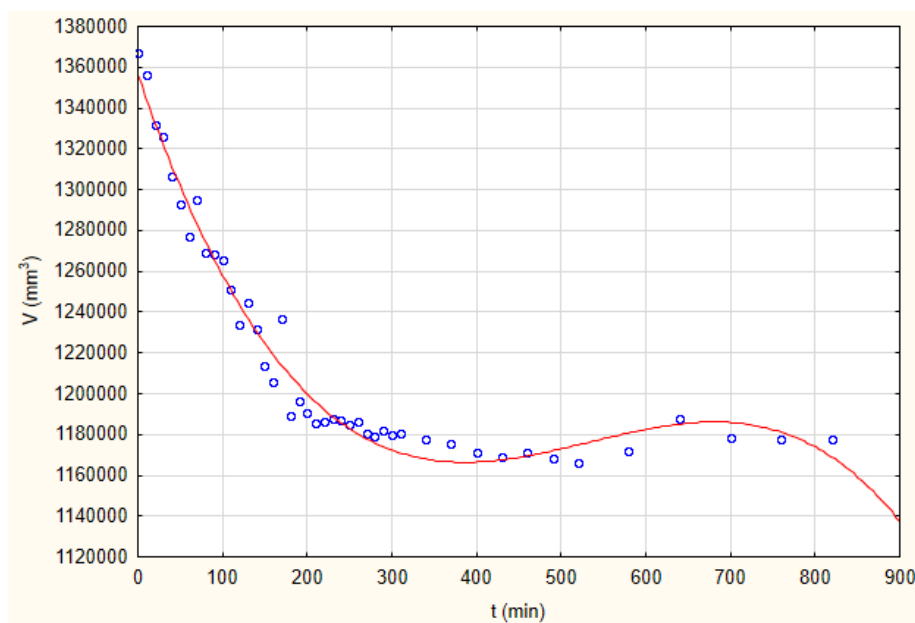
O software Statística® também fornece os gráficos das funções estimadas comparadas com os pontos experimentais coletados. Nas Figuras de 3 a 5 estão evidenciadas as funções

encontradas para o comportamento transiente do volume do tijolo nas condições operacionais de 50°C a 100°C. Já nas Figuras 6 a 8 estão ilustradas as funções encontradas para descrever o comportamento transiente da área superficial externa nas mesmas condições operacionais e, por fim, as Figuras 9 a 11 ilustram as funções encontradas para a área superficial interna em função do tempo de processo, nas condições operacionais de 50°C a 100°C.

Figura 3. Variação volumétrica experimental (\circ) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 50°C e b) 60°C.



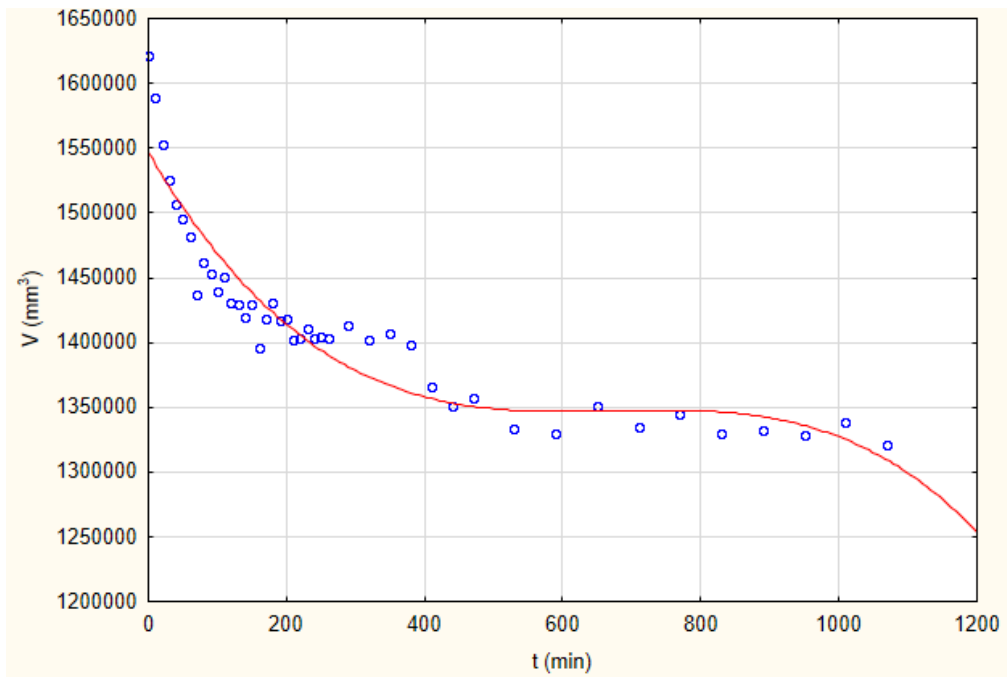
a)



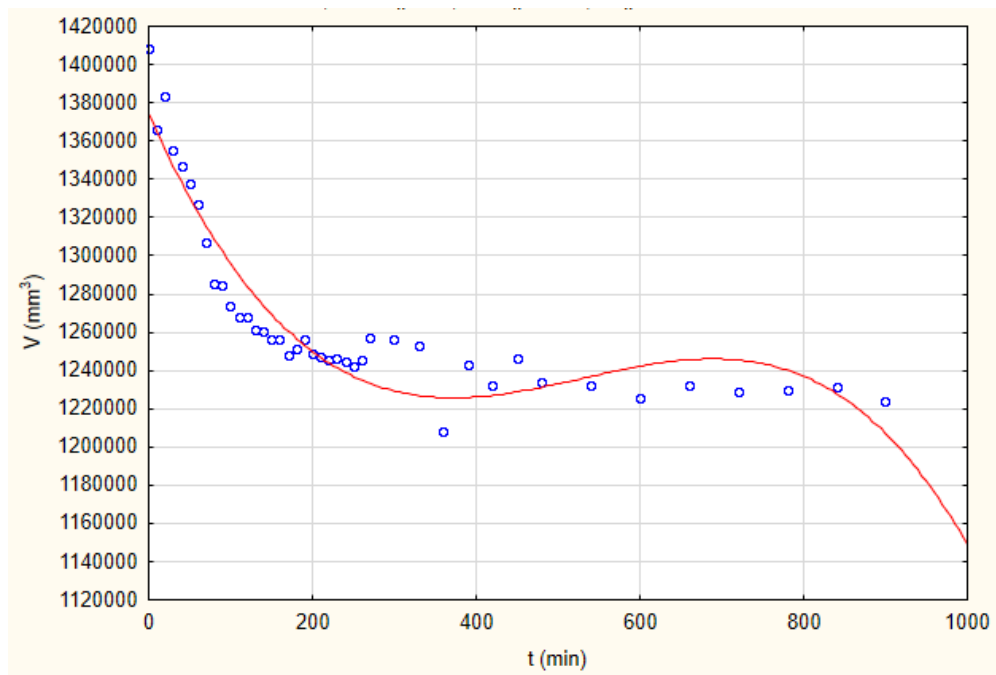
b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 4. Variação volumétrica experimental (\circ) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 70°C e b) 80°C.



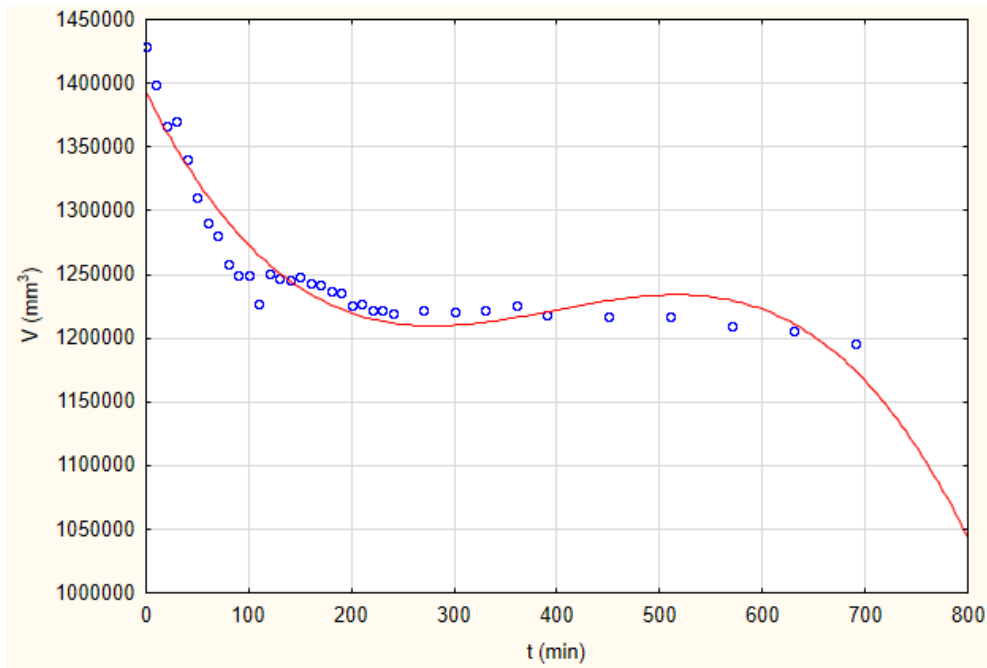
a)



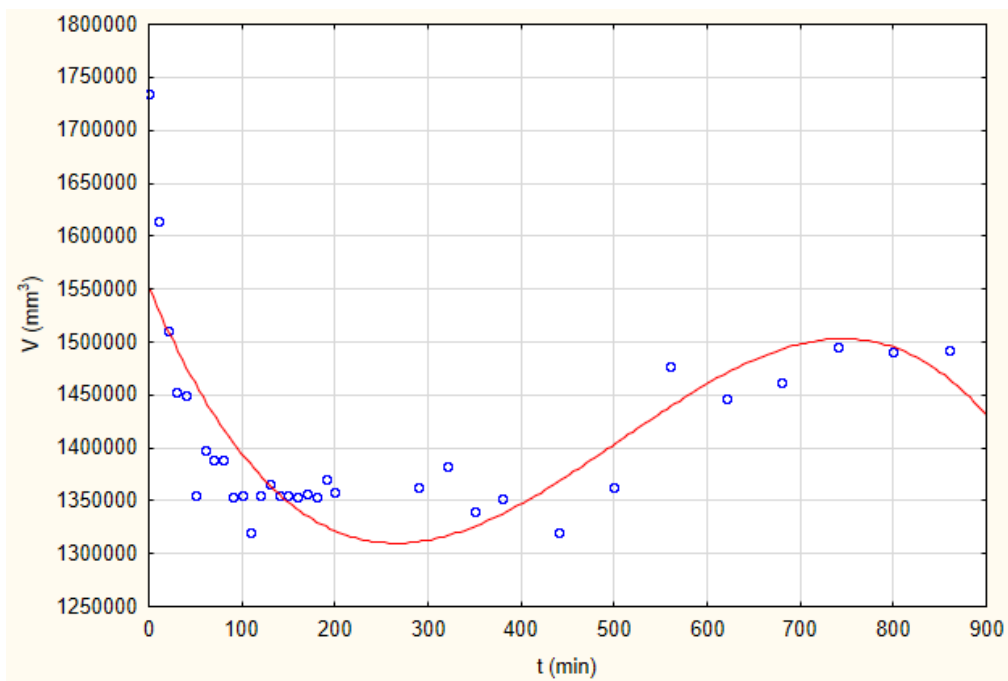
b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 5. Variação volumétrica experimental (\circ) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 90°C e b) 100°C.



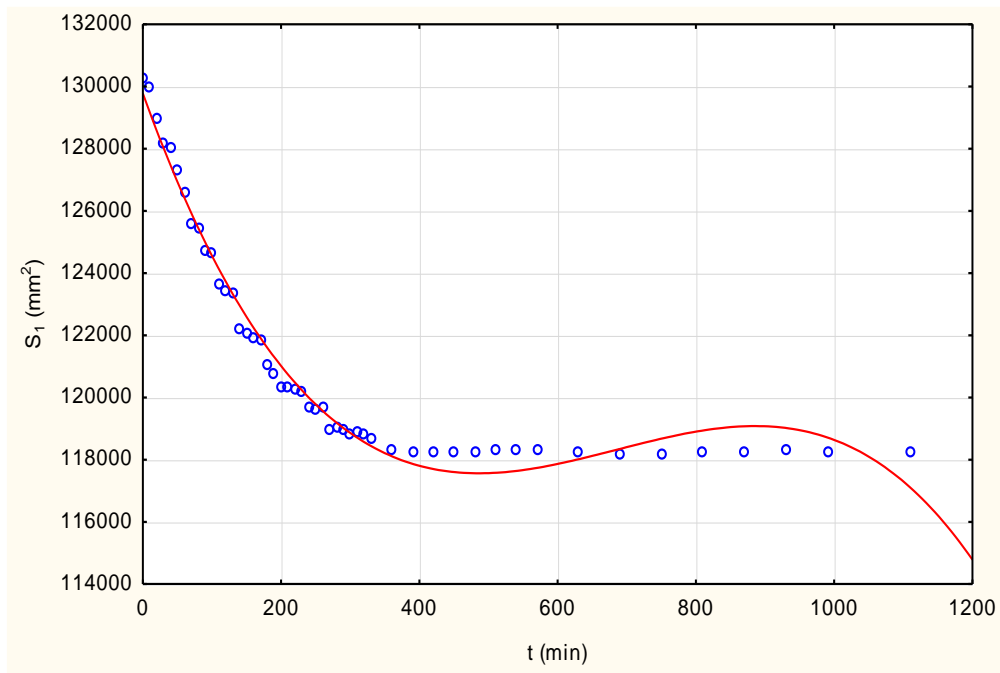
a)



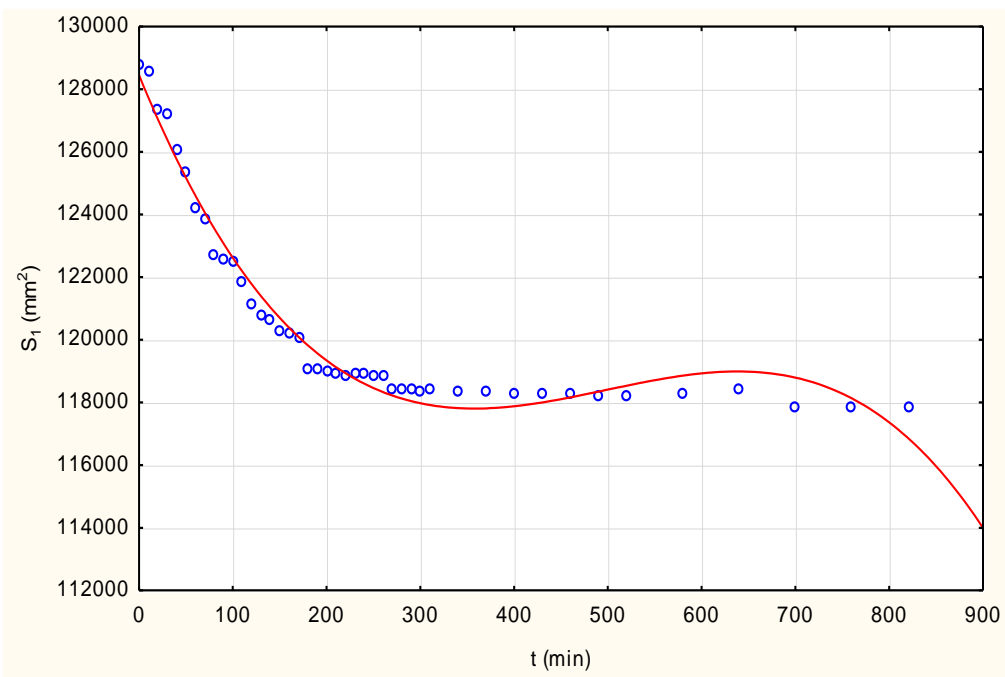
b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 6. Variação da área superficial externa experimental (\circ) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 50°C e b) 60°C.



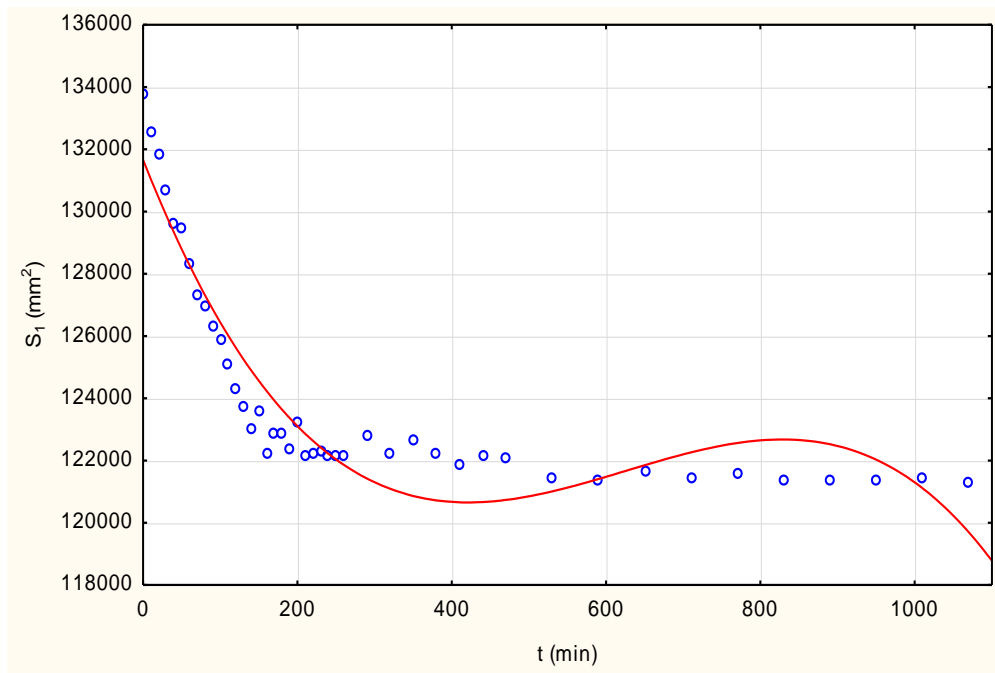
a)



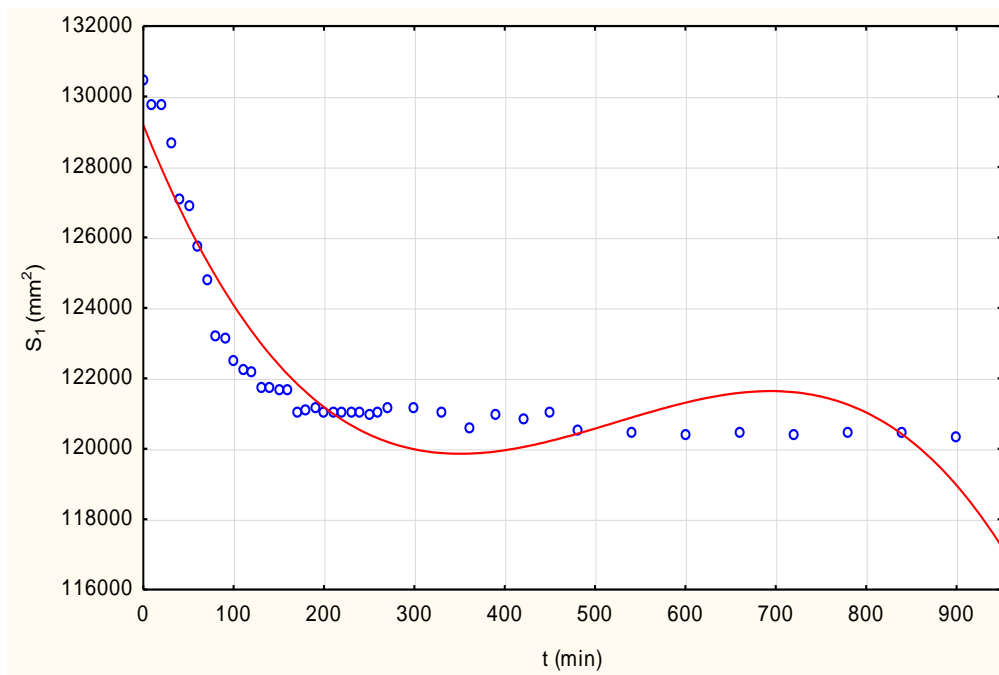
b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Figuras 7. Variação da área superficial externa experimental ($\circ\circ\circ$) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 70°C e b) 80°C.



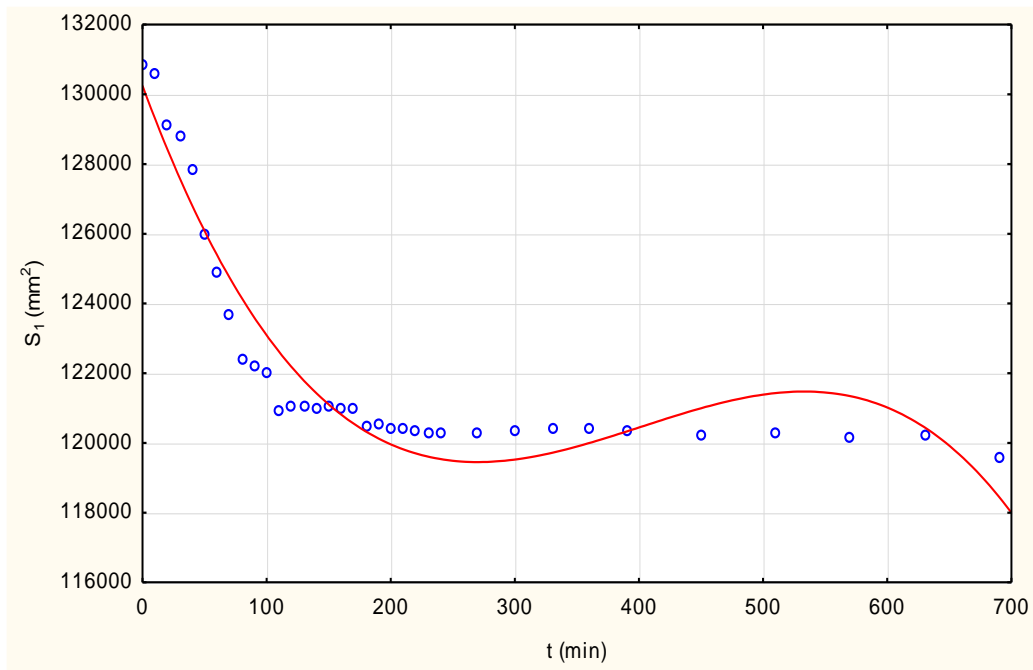
a)



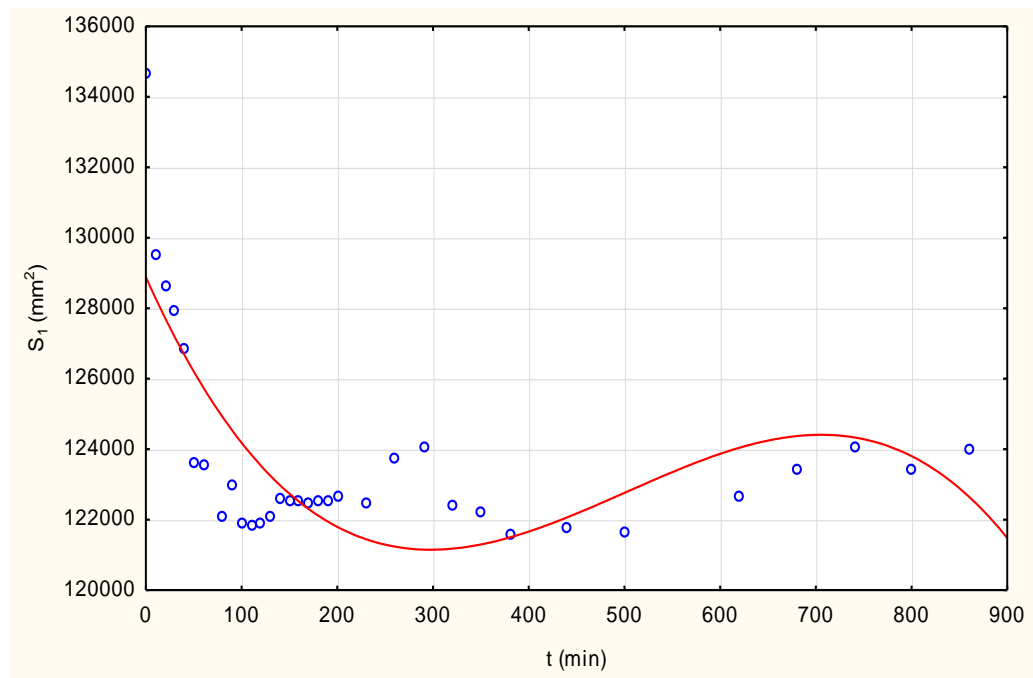
b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Figuras 8. Variação da área superficial externa experimental (\circ) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 90°C e b) 100°C.



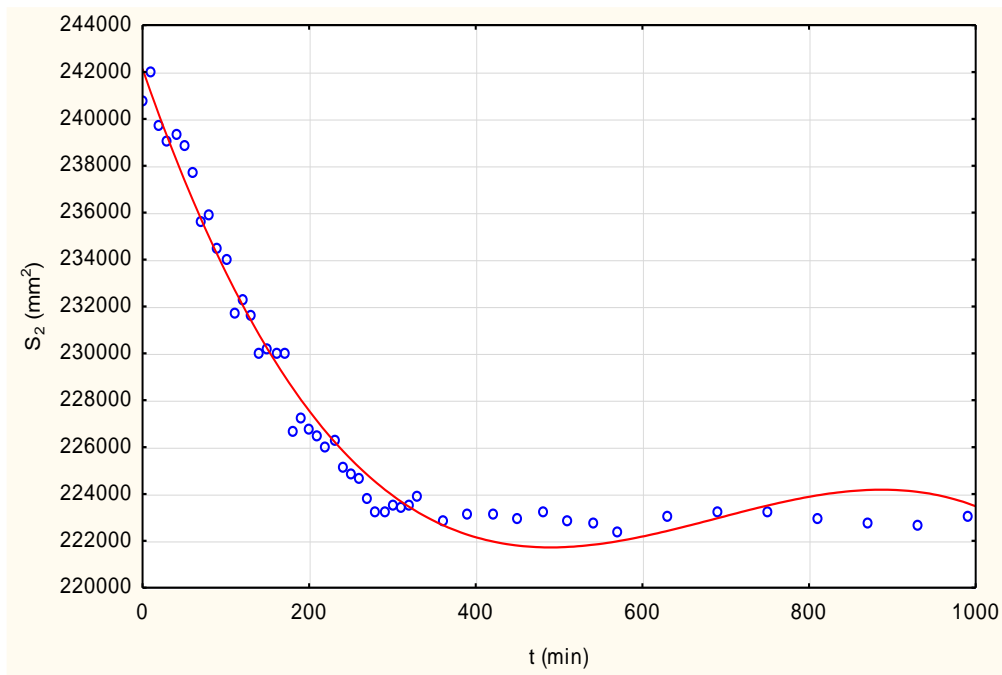
a)



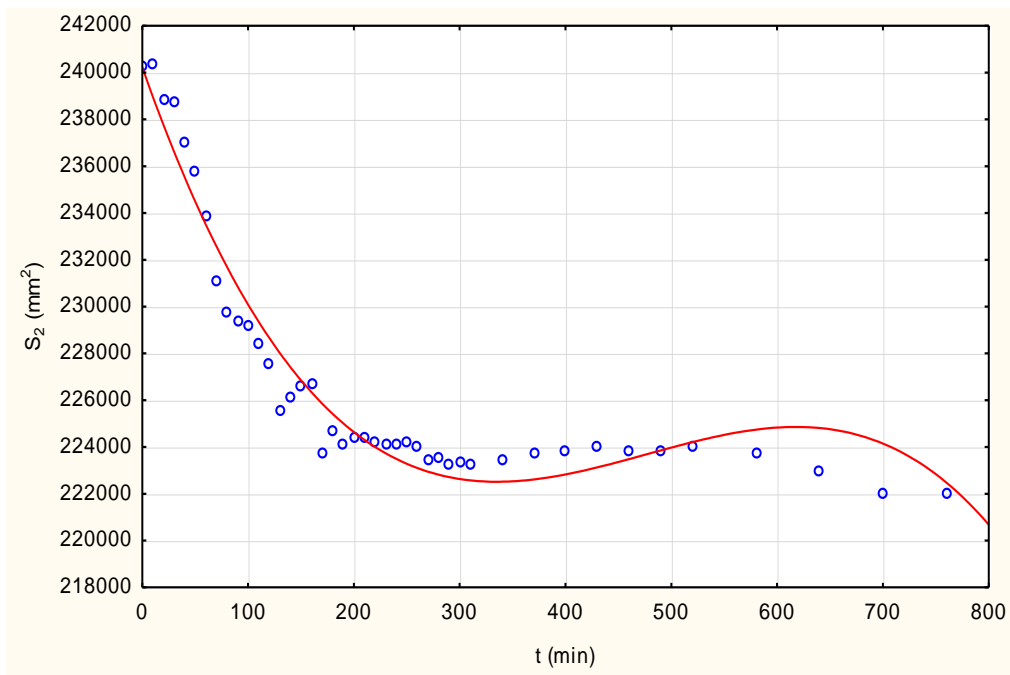
b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 9. Variação da área superficial interna experimental (\circ) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 50°C e b) 60°C.



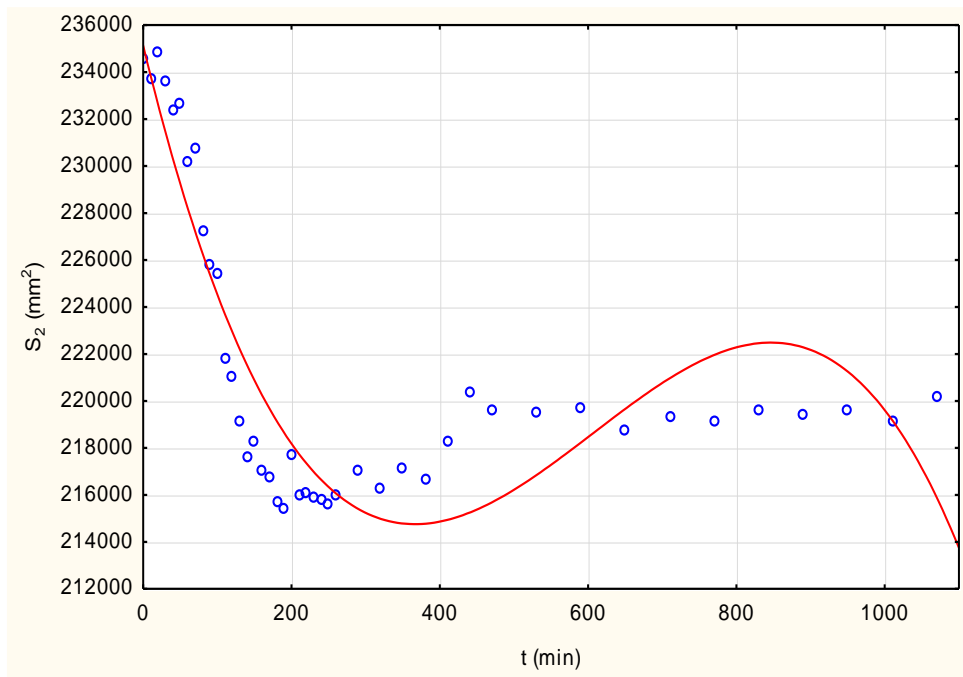
a)



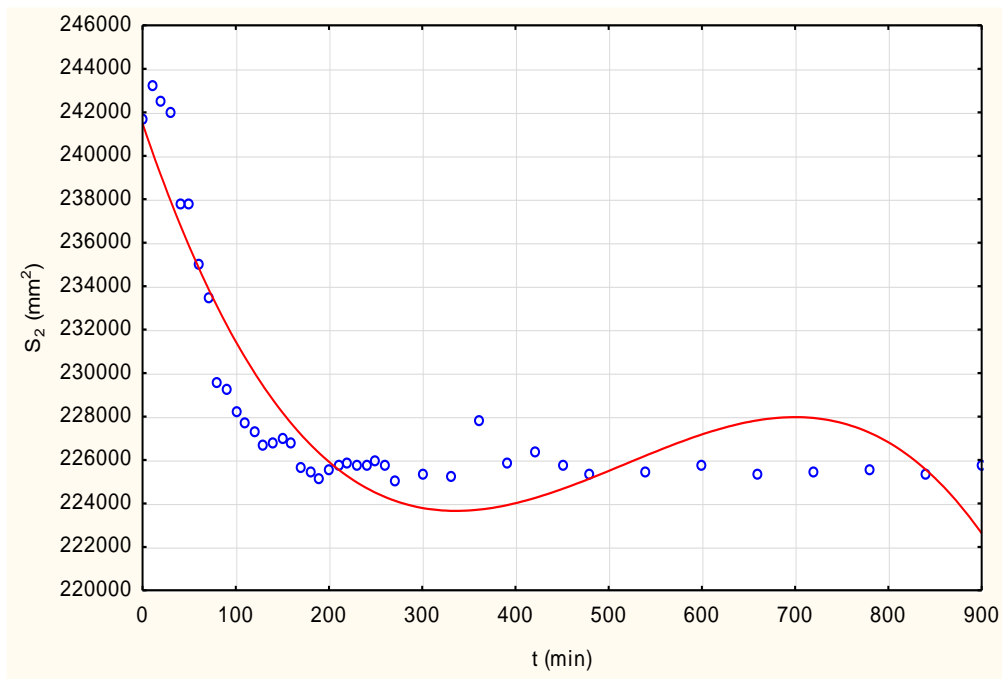
b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Figuras 10. Variação da área superficial interna experimental (\circ) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 70°C e b) 80°C.



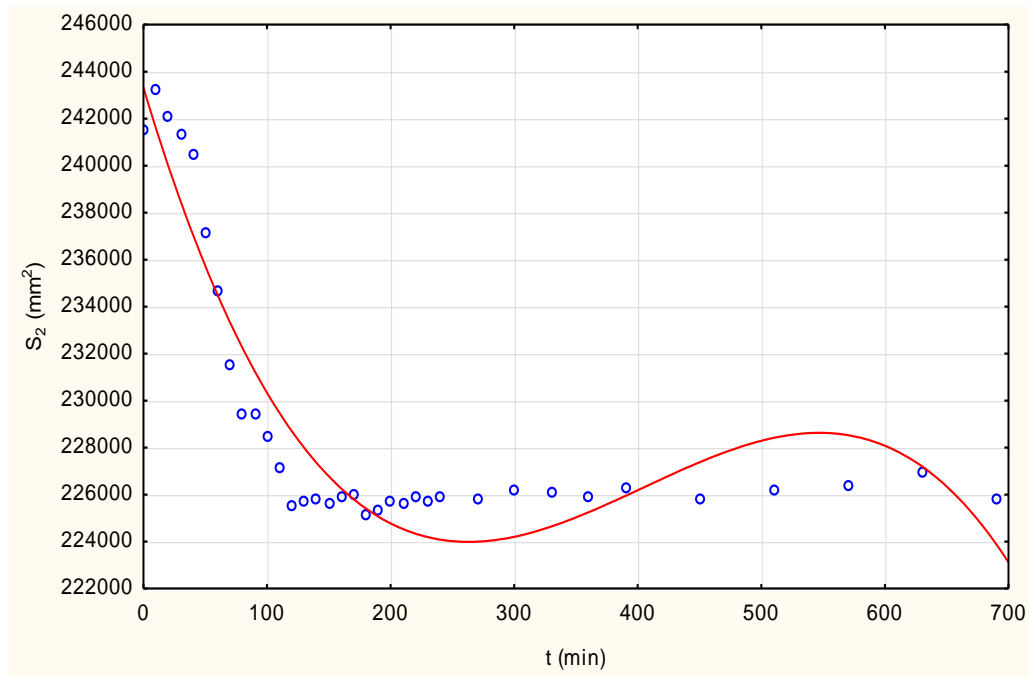
a)



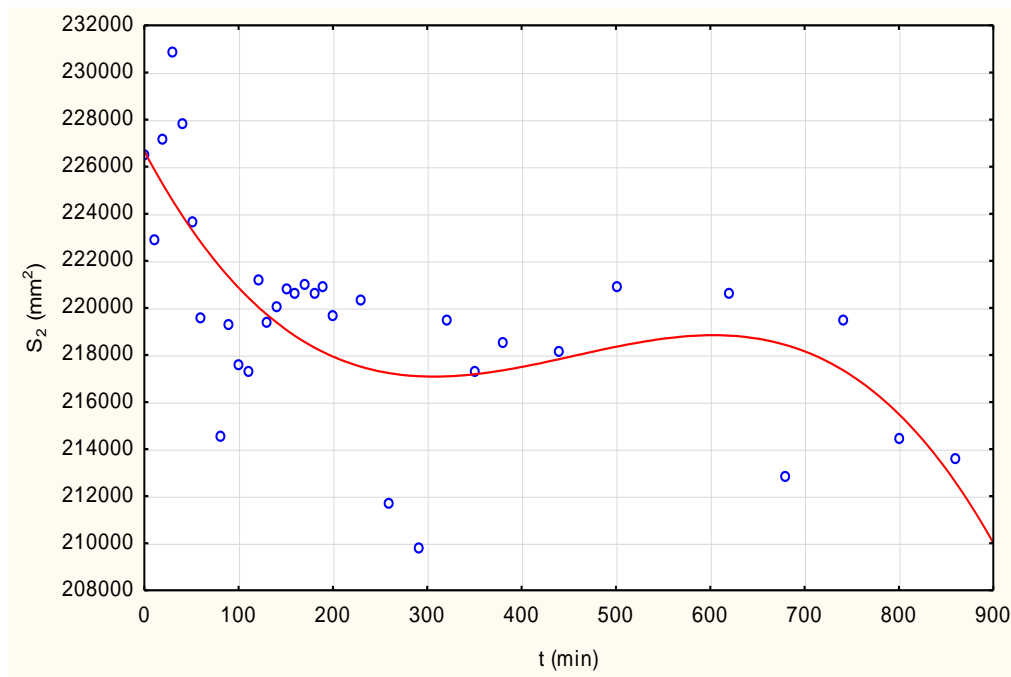
b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Figuras 11. Variação da área superficial interna experimental (\circ) e predita (—) do tijolo durante a secagem a) 90°C e b) 100°C.



a)



b)

Fonte: Dados da pesquisa.

Após análises das Tabelas 4 a 6 e Figuras 3 a 11, é possível perceber que um bom ajuste foi obtido, e que o volume e a área superficial têm um comportamento decrescente com o decorrer do tempo. Isso ocorre justamente pelo fato de uma massa de água estar sendo

evaporada durante a secagem (encolhimento) e o tijolo está sendo aquecido durante o processo (expansão volumétrica), o que provocou oscilações nas dimensões do tijolo principalmente para tempos longos, onde o material está mais seco. Vale salientar que esse decréscimo e oscilações são maiores na secagem com temperaturas mais elevadas.

Também é possível perceber que na temperatura de 100°C, o ajuste foi menos preciso, tanto para a variação do volume como para a da área superficial. Isso ocorre devido a possíveis erros de medição das dimensões dos tijolos e grandes variações de temperatura, devido ao fato de que o tijolo era retirado da estufa para que se pudesse realizar as medições.

Além disso, pode-se verificar que, a 50°C, o volume do tijolo sofreu uma redução de 17,88% e, a 100°C, essa redução foi de 20,57%. A 100°C, a quantidade de água evaporada é maior. Quanto a área superficial externa, verificou-se que, a 50°C, o tijolo sofreu uma redução de 9,22% e, a 100°C, essa redução foi de 7,56%. Já para a área superficial interna, a 50°C, o tijolo sofreu uma redução de 7,52% enquanto que, a 100°C, essa redução foi de apenas 4,86%. Proporcionalmente, a redução da área foi bem menor que a do volume, o que mostra que a secagem foi feita de forma adequada e o tijolo não sofreu grandes deformações, mantendo a sua forma original, porém em um tamanho menor.

Pode-se observar, ainda, que a área superficial interna do tijolo é maior do que a área superficial externa, expostas aos fenômenos de transferência de calor e massa, o que certamente, provoca uma diferença nos coeficientes de transferência de calor convectivos de massa e calor nas superfícies internas (furos) e externa do tijolo.

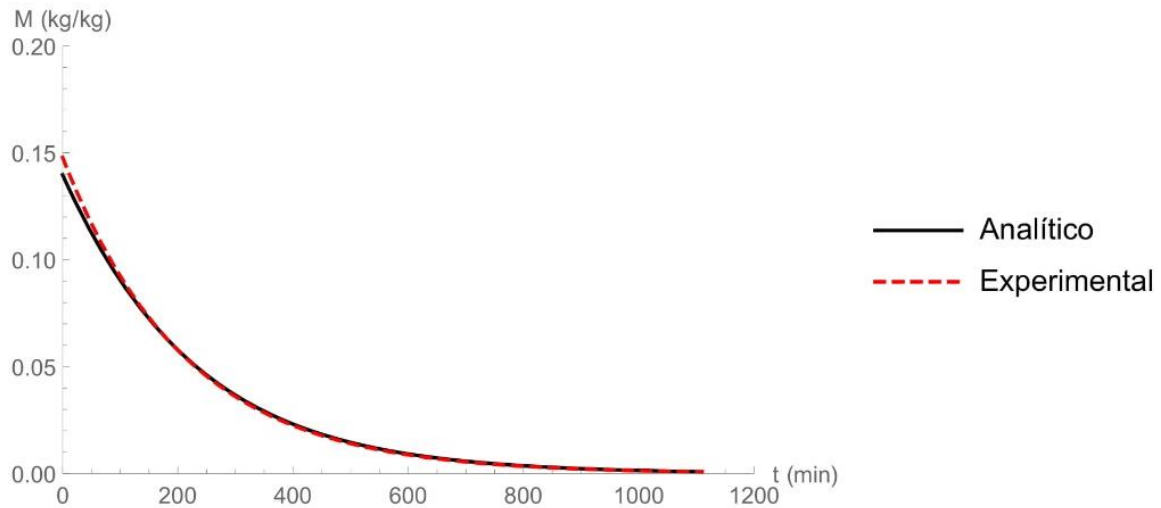
Análise gravimétrica

Para fazer a estimativa dos coeficientes de transferência de massa convectivos nas diferentes temperaturas de secagem, fez-se uma comparação entre teor de umidade médio do tijolo, predito (Equação 5) e experimental (Equação 1), até se atingir um erro mínimo.

As Figuras 12 e 13 ilustram uma comparação entre os teores de umidade médio predito e experimental do tijolo em função do tempo para secagens realizadas à 50 e 100°C, respectivamente. Analisando essas figuras, nota-se que há excelente concordância entre os valores previstos pelo modelo utilizado e experimentais, confirmando assim que a modelagem utilizada para a estimativa dos parâmetros de transporte de massa é eficaz. De forma geral verifica-se que a secagem ocorre numa taxa decrescente, que nas duas primeiras horas de processo a perda de massa é mais intensa, e que a taxa de secagem é mais elevada quando a

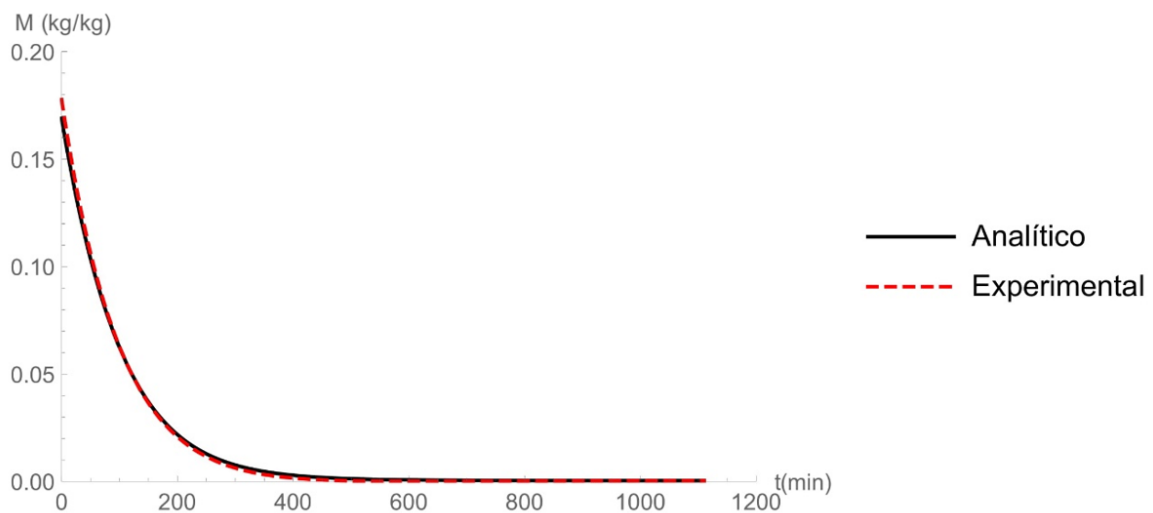
temperatura do ar de secagem é mais alta, o que conduz a uma redução significativa no tempo total de secagem.

Figura 12. Teor de umidade, predito e experimental, do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem ($T = 50^{\circ}\text{C}$).



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 13. Teor de umidade, predito e experimental, do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem ($T = 100^{\circ}\text{C}$).



Fonte: Dados da pesquisa.

Análise térmica

De maneira semelhante ao procedimento adotado para o teor de umidade, para encontrar os coeficientes de transferência de calor convectivos nas diferentes temperaturas de

secagem, fez-se uma comparação entre a temperatura no vértice do tijolo, predita e experimental (Equação 11), até se atingir um erro mínimo. A Tabela 7 resume os coeficientes da Equação 11, obtidos após ajuste aos dados experimentais.

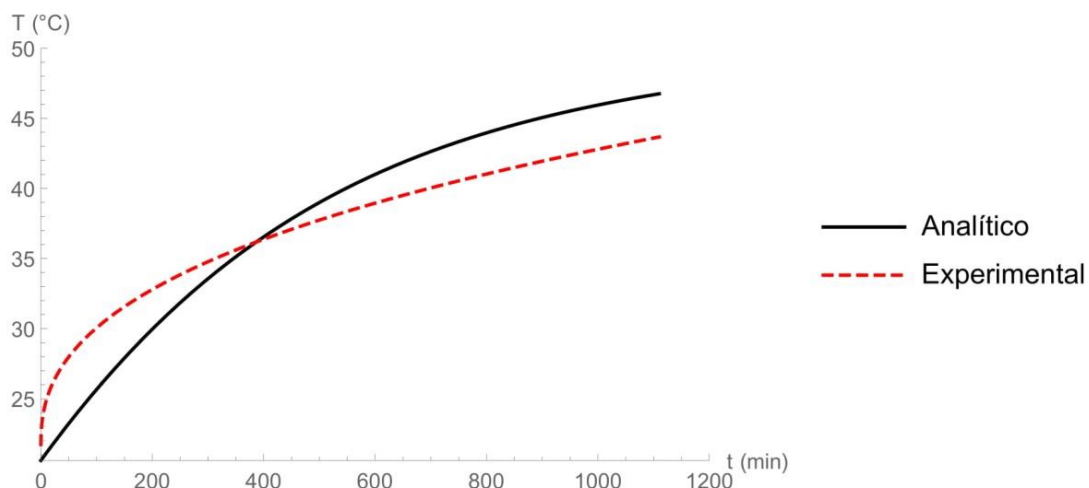
Tabela 7. Parâmetros da Equação 11 obtidos após ajuste aos dados experimentais de temperatura da amostra.

T (°C)	Parâmetro				R	Proporção da variância
	\bar{b}_1 (°C)	\bar{b}_2 (°C/min)	k_3 (-)	\bar{b}_3 (min)		
50	-546,0430	283,1605	0,42554	101,18296	0,960840804	0,923215051
60	-48,7454	39,22594	0,86804	66,362934	0,981233190	0,962818573
70	-18,4408	40,19277	0,698315	11,943974	0,953411275	0,908993060
80	-21,3661	37,35810	0,871389	14,410538	0,970896765	0,942640529
90	-30,7995	33,11958	1,222654	47,338410	0,981074082	0,962506354
100	-2,86969	15,41788	2,234665	118,38213	0,984632771	0,969501694

Fonte: Dados da pesquisa.

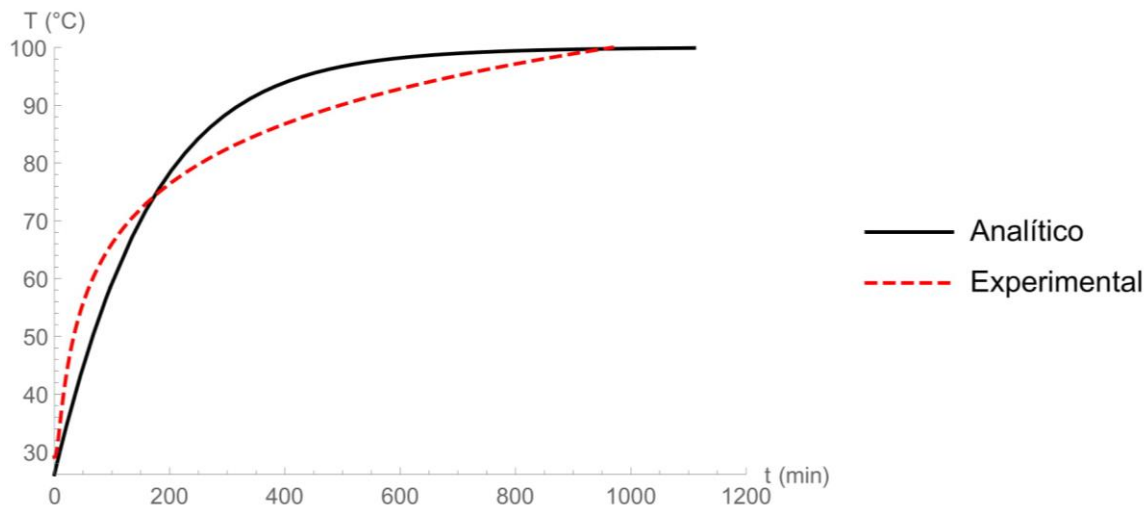
As Figuras 14 e 15 ilustram as curvas de ajuste da temperatura do tijolo em função do tempo para secagens realizadas à 50 e 100°C, respectivamente.

Figura 14. Temperatura na superfície do tijolo, predita e experimental, em função do tempo de secagem (T = 50°C).



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 15. Temperatura na superfície do tijolo, predita e experimental, em função do tempo de secagem ($T = 100^{\circ}\text{C}$).



Fonte: Dados da pesquisa.

Ao se avaliar a Tabela 7 e as Figuras 14 e 15, nota-se que houve uma boa concordância entre os valores experimentais e os valores determinados através da metodologia adotada. A eficácia do ajuste não foi tão boa como na transferência de massa, mas isso ocorreu pelo fato do modelo analítico desenvolvido levar em consideração apenas a transferência de calor, desconsiderando a transferência de massa que ocorre simultaneamente com a transferência de calor. Além disso, as medições de temperatura estão sujeitas a alguns erros de posição de medida, como também, devido à perda de calor do tijolo para o ambiente externo a estufa, não contemplados no modelo matemático.

Após análise das Figuras 14 e 15 verifica-se que as taxas de aquecimento são mais elevadas quando a temperatura do ar é mais alta. No entanto, vale salientar que, secagem a altas temperaturas e baixas umidades relativa do ar provocará aquecimento e remoção de água mais elevadas, e afetará a qualidade do produto cerâmico para posterior uso na etapa de queima. O que não é aconselhável.

Estimação dos parâmetros de transporte

Após as análises gravimétrica e térmica foram encontrados os parâmetros de processo para as diferentes condições secagem. A Tabela 8 resume os valores médios das áreas superficiais interna (furo) e externa, e volume do tijolo, durante o processo de secagem. Na

Tabela 9 estão fornecidos os valores combinados coeficientes de transferência de calor e massa convectivos, com os respectivos erros obtidos a partir das Equações 24 e 25.

$$ERM = \sum_{i=1}^{110} (\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{exp})^2 \quad (24)$$

$$ERT = \sum_{i=1}^{110} \left[\frac{\theta_{pred} - \theta_{exp}}{\theta_{pred}} \right]^2 \quad (25)$$

Tabela 8. Valores médios do volume e das áreas superficiais interna e externa do tijolo em diferentes condições operacionais.

T (°C)	\bar{S}_1 (mm ²)	\bar{S}_2 (mm ²)	\bar{V} (mm ³)
50	119474,041	225237,087	1201245,612
60	119468,454	225187,615	1198659,134
70	122589,517	219715,462	1374472,966
80	121441,717	227139,503	1249522,600
90	121388,362	227800,715	1237266,608
100	123156,310	218891,018	1397796,876

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 9. Parâmetros convectivos de processo estimados a partir do ajuste das Equações 5 e 9 aos dados experimentais.

T (°C)	$\left(\frac{h_{m1} \bar{S}_1 + h_{m2} \bar{S}_2}{\bar{V}} \right)$ (min ⁻¹)	ERM ([kg/kg] ²)	$\left(\frac{h_{c1} \bar{S}_1 + h_{c2} \bar{S}_2}{\rho c_p \bar{V}} \right)$ (min ⁻¹)	ERT [°C/°C] ²)
50	0,00446	0,000397	0,00196	0,765717
60	0,00562	0,000396	0,00268	0,335325
70	0,00680	0,000199	0,00387	0,429352
80	0,00867	0,000306	0,00451	0,759025
90	0,00945	0,000573	0,00515	0,500457
100	0,01014	0,000417	0,00688	0,556712

Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando os parâmetros de secagem encontrados em função das temperaturas do ar de secagem, nota-se que há um aumento no valor desses parâmetros com o aumento da temperatura de secagem. A elevação da temperatura implica no aumento nas taxas de

secagem e aquecimento do tijolo, o que faz com que sejam alcançadas as condições de equilíbrio térmico e higroscópico com maior rapidez.

4. Considerações Finais

Nesta pesquisa, um estudo teórico relacionado à secagem de tijolos cerâmicos industriais é feita. Toda a pesquisa é baseada em modelos matemáticos concentrados. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) O processo de secagem de tijolos cerâmicos industriais em altas temperaturas ocorre com maiores taxas de secagem e aquecimento, e em um menor tempo de processo.
- b) Os modelos matemáticos polinomiais propostos para prever o comportamento do volume e das áreas superficial interna (furos) e externa do tijolo cerâmico durante o processo de secagem mostraram-se adequados.
- c) Em altas temperaturas (100°C), a variação volumétrica foi de 20,57% enquanto que a área superficial externa variou em 7,56% e a área superficial interna variou em 4,86%.
- d) A modelagem matemática para prever as transferências de calor e de massa e a estimativa dos parâmetros de secagem, levando em consideração as variações dimensionais do tijolo durante o processo, foi considerada satisfatória.
- e) Os parâmetros de secagem e aquecimento do sólido, que levam em consideração as áreas superficiais interna e externa e volume do tijolo, bem como os coeficientes de transferência de calor e de massa convectivos nas regiões externa e do furo do material, estimados pelos modelos matemáticos desenvolvidos, aumentaram com o aumento da temperatura de secagem.

Agradecimentos

O presente trabalho foi desenvolvido no programa PIBIC/CNPq-UFPA e foi realizado com apoio financeiro do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, da CAPES e da FINEP.

Referências

Almeida, G. S., Silva, J. B., Silva, C. J., Swarnakar, R., Neves, G. A., Lima, A. G. B. (2013). Heat and mass transport in an industrial tunnel dryer: modeling and simulation applied to

hollow bricks. *Applied Thermal Engineering*, 55, 78-86.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.042>

Almeida, G. S., Tavares, F. V. S., Lima, W. M. P. B., Lima, A. G. B. (2016). Energetic and exergetic analysis of the clay bricks drying in an industrial tunnel dryer. *Defect and Diffusion Forum*, 369, 104 – 109. 10.4028 / www.scientific.net / DDF.369.104

ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica). Dados do setor. Recuperado de <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>.

Araújo, M. V., Santos, R. S., Silva, R. M., Nascimento, J. B. S., Santos, W. R. G., Lima, A. G. B. (2019). Drying of industrial hollow ceramic brick: A numerical analysis using CFD. *Defect and Diffusion Forum*, 391, 48 - 53. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.391.48>

Avelino, D. O. (2008). *Estudo experimental da secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais*. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Departamento de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande.

Brito, M. K. T., Almeida, D. B. T., Lima, A. G. L., Rocha, L. A., Lima, E. S., Oliveira, V. A. B. (2017) Heat and mass transfer during drying of clay ceramic materials: a three-dimensional analytical study. *Diffusion Foundations*, 10, 93 - 106. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DF.10.93>

Coelho, J. M. (2009). *Projeto de assistência técnica ao setor de energia: perfil de argilas para cerâmica vermelha*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, (Relatório Técnico, 32). Recuperado de http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P23_RT32_Perfil_da_Argila+%281%29.pdf/66e440a8-195e-0e2f-3922-e2d038af7537?version=1.0

Heydari, M., Khalili, K., Ahmadi-Brooghani. S. Y. (2018). More Comprehensive 3D Modeling of Clay-like Material Drying. *AIChE Journal*, 64(4), 1469-1478. <https://doi.org/10.1002/aic.16027>

Lima, W. M. P. B. (2017). *Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: Modelagem e simulação*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil. Recuperado de <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/371>

Macedo, R. S., Menezes, R. R., Neves, G. A., Ferreira, H. C. (2008). Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. *Cerâmica*. 54(332), 411-417. Recuperado de <https://www.scielo.br/pdf/ce/v54n332/05.pdf>

Silva, A. A., Nascimento, J. J. S., Lima, A. G. B. (2009) Estudo analítico de secagem de placas cerâmicas usando o método integral baseado em Galerkin e condição de contorno de Dirichlet. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. 4(2), 48-55.

Silva, J. B. (2009). *Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande.

Silva, J. B., Almeida, G. S., Lima, W. C. P. B., Neves, G. A., Lima, A. G.B. (2011). Heat and mass diffusion including shrinkage and hygrothermal stress during drying of holed ceramics bricks. *Defect and Diffusion Forum*, 312-315, 971-976. 10.4028 / [www.scientific.net / DDF.312-315.971](http://www.scientific.net/DDF.312-315.971)

Silva, S. K. B. M. (2018). *Secagem de tijolos cerâmicos industriais: estimativa de parâmetros de processo via modelo concentrado*. Trabalho de conclusão de curso (TCC). Departamento de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande.

Tavares, F. V. S., Farias Neto, S. R., Barbosa, E. S., Lima, A. G. B., Silva, C. J. (2014). Drying of ceramic hollow bricks in an industrial tunnel dryer: A finite volume analysis. *International Journal of Multiphysics*, 8(3), 297 – 312

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Lucas Pereira Castanheira Nascimento – 40%

Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva – 10%

Elisiane Santana de Lima – 5%

Hortência Luma Fernandes Magalhães – 10%

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 5%

Ricardo Soares Gomez – 5%

Túlio Rafael Nascimento Porto – 5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima – 20%