

**Secagem de tijolos cerâmicos industriais e estimativa de parâmetros do processo: uma abordagem concentrada avançada**

**Drying of industrial ceramic bricks and process parameter estimation: an advanced concentrated approach**

**Secado de ladrillos cerámicos industriales y estimación de parámetros de proceso: un enfoque concentrado avanzado**

Recebido: 21/12/2020 | Revisado: 27/12/2020 | Aceito: 28/12/2020 | Publicado: 31/12/2020

**Elisiane Santana de Lima**

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [limaelisianelima@hotmail.com](mailto:limaelisianelima@hotmail.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:wan_magno@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](mailto:katherine.b.moura@gmail.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](mailto:hortencia.luma@gmail.com)

**Lucas Pereira Castanheira Nascimento**

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [lucaspereira.cn@hotmail.com](mailto:lucaspereira.cn@hotmail.com)

**Ricardo Soares Gomez**

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [ricardosoaresgomez@gmail.com](mailto: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](mailto: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](mailto:antonio.gilson@ufcg.edu.br)

## **Resumo**

Este trabalho objetiva estudar a secagem de sólidos porosos e com forma arbitrária usando o método da análise concentrada. Um modelo matemático fenomenológico avançado baseado numa análise concentrada e sua solução exata são apresentados para prever as transferências de massa e calor em tijolos cerâmicos vazados industriais e estimar os coeficientes de transporte. Diferentes simulações foram realizadas para avaliar o efeito da temperatura do ar no processo de secagem. Resultados transientes do teor de umidade e temperatura do tijolo, e dos coeficientes de transferência de calor e massa convectivos são apresentados e discutidos. Verificou-se que, quanto maior a temperatura, maiores são os coeficientes de transferência de calor e massa convectivos na superfície do tijolo, e mais rápido o produto perde umidade e eleva sua temperatura. Do estudo, propõe-se uma condição otimizada de secagem do tijolo cerâmico industrial visando minimizar os defeitos no produto pós-secagem, aumentar sua qualidade para a etapa de queima, reduzir desperdícios de matéria-prima e economizar energia no processo.

**Palavras-chave:** Secagem; Materiais cerâmicos; Modelo concentrado; Analítico; Simulação.

## **Abstract**

This work aims to study the drying of porous and arbitrarily shaped solids using the concentrated analysis method. An advanced phenomenological mathematical model based on concentrated analysis and its exact solution are presented to predict the mass and heat transfers in industrial hollow ceramic bricks and to estimate the transport coefficients. Different simulations were carried out to evaluate the effect of air temperature on the drying process. Transient results of the moisture content and temperature of the brick, and of the convective heat and mass transfer coefficients are presented and discussed. It was found that the higher the temperature the greater the convective heat and mass transfer coefficients on

the brick surface, and the faster the product loses moisture and raises its temperature. From the study, an optimized drying condition of the industrial ceramic brick is proposed in order to minimize defects in the post-drying product, increase its quality for the firing step, and reduce waste of raw material and save energy in the process.

**Keywords:** Drying; Ceramic materials; Concentrated model; Analytical; Simulation.

## Resumen

Este trabajo tiene como objetivo estudiar el secado de sólidos porosos y de forma arbitraria mediante el método de análisis concentrado. Se presenta un modelo matemático fenomenológico avanzado basado en análisis concentrado y su solución exacta para predecir las transferencias de masa y calor en ladrillos cerámicos de fundición industrial y estimar los coeficientes de transporte. Se realizaron diferentes simulaciones para evaluar el efecto de la temperatura del aire en el proceso de secado. Se presentan y discuten los resultados transitorios del contenido de humedad y la temperatura del ladrillo, y los coeficientes de transferencia de masa y de calor convectivos. Se encontró que cuanto más alta es la temperatura, mayores son los coeficientes de calor convectivo y transferencia de masa en la superficie del ladrillo, y más rápido el producto pierde humedad y aumenta su temperatura. A partir del estudio, se propone una condición de secado optimizada del ladrillo cerámico industrial con el fin de minimizar los defectos en el producto post-secado, aumentar su calidad para la etapa de cocción, reducir el desperdicio de materia prima y ahorrar energía en el proceso.

**Palabras clave:** Secado; Materiales cerâmicos; Modelo concentrado; Analítico; Simulación.

## 1. Introdução

O setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolante térmicos (ABCERAM, 2017).

A cerâmica vermelha é uma classe de material com coloração avermelhada empregado na construção civil em diferentes formas, tais como: tijolos, blocos, telhas, pisos, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos, vasos decorativos, argilas expandidas e também utensílios de uso doméstico e de adorno, entre outros.

O setor ceramista, por se tratar de um setor que produz tijolos furados e maciços, blocos estruturais, telhas e pisos, a cerâmica vermelha também conhecida como cerâmica estrutural, é considerado como um setor de base ao possibilitar o desenvolvimento da construção civil (Bustamante & Bressiani, 2000).

O setor de cerâmica vermelha, do ponto de vista de matéria prima, utiliza apenas a argila comum, ou seja, usa-se de uma massa cujo único componente é a argila. As argilas contém uma grande variedade de substâncias minerais de natureza argilosa, tais como: argilas aluvionares quaternárias, argilitos, siltitos, folhelhos e ritmitos, que queimam em cores avermelhadas, a temperaturas que variam entre 800 e 1.250°C. Essas argilas possuem geralmente granulometria muito fina (Alvarez de Buergo & Limon, 1994), característica que lhes conferem, com a matéria orgânica incorporada, diferentes graus de plasticidade, quando adicionada de determinadas porcentagens de água; além da trabalhabilidade e resistência a verde, a seco e após o processo de queima, aspectos importantes para fabricação de uma grande variedade de produtos cerâmicos (Cabral Jr. et al., 2008).

Os materiais cerâmicos são peças bastante utilizadas pela indústria civil e o seu processo de fabricação compreende diversas fases: exploração das jazidas, tratamento prévio das matérias primas, homogeneização, secagem, queima e a expedição (Sahu et., al, 2016; Avelino, 2018; Gomez et al., 2020).

O processo termodinâmico por meio do qual ocorre a redução da umidade do sólido mediante qualquer quantidade apreciável de energia térmica para evaporar a água e aquecer o sólido úmido é denominado de secagem. Esta secagem é dada a partir do transporte de umidade, do núcleo para a superfície do material, este transporte pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do sólido e do percentual de umidade presente. Na secagem convectiva, o estado do ar atmosférico, temperatura, umidade relativa e velocidade são condições (parâmetros predominantes) para a determinação da duração da secagem.

Com a secagem feita de forma incorreta, a retirada de água da peça fica sem controle o que pode causar danos estruturais como trincas, deformações, empenamentos e conseqüentemente uma grande perda de produtos, por isso operações de secagem são importantes processos industriais e conhecer o mecanismo da transferência de umidade e calor é de fundamental importância para a indústria cerâmica. E isto pode ser feito mediante um estudo teórico apurado e preciso, de forma que se possa determinar os parâmetros de processo e seus efeitos sobre a qualidade do produto final (Silva et al., 2011).

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. Dependendo do material estudado, estes modelos matemáticos aplicados a secagem podem ser classificados em modelos concentrado ou distribuído.

Os modelos concentrados descrevem as taxas de transferência de calor e massa para o material, ignorando a resistência interna de transferência de calor e massa, estas equações negligenciam os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do material.

Neste contexto, algumas pesquisas relacionadas a modelos de secagem aplicados a materiais cerâmicos, baseando-se numa análise concentrada, são reportadas na literatura (Almeida et al., 2003; Lima, 2014; Silva, 2016; Silva et al., 2016; Lima et al., 2018; Lima et al., 2020a; Nascimento et al., 2020; Lima et al. 2020b; Lima et al., 2020c).

Desta forma, percebeu-se assim a necessidade de estudar modelos concentrados mais completos (fenomenológicos) e que envolve parâmetros externo e interno ao sólido poroso e úmido, visando dar uma contribuição na predição do fenômeno de transporte de calor e massa durante a secagem do material.

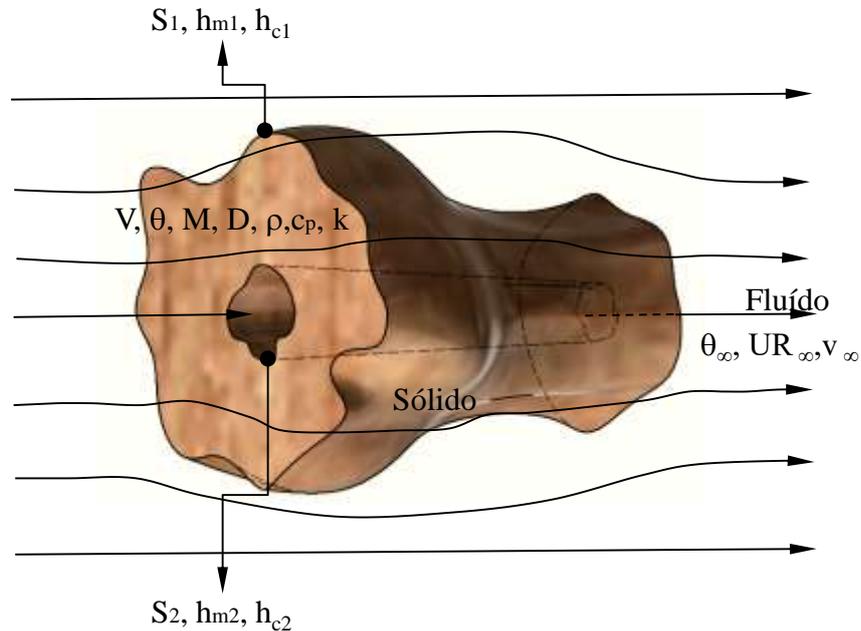
Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo estudar a transferência de calor e massa em sólidos porosos e com forma arbitrária usando o método da análise concentrada com particular referência a secagem e tijolos cerâmicos industriais, vazados e com forma arbitrária. Trata-se, portanto, de uma pesquisa puramente quantitativa, como classificada por Pereira et al. (2018), onde discute-se tópicos relevantes de interessa da indústria e comunidade científica.

## **2. Metodologia**

### **2.1 O problema físico e a geometria**

Para o entendimento do método da análise concentrada considere um corpo sólido de forma arbitrária e vazado como ilustrado na Figura 1. O sólido pode receber (ou ceder) um fluxo de calor e/ou umidade por unidade de área em sua superfície. O método da análise concentrada admite que a umidade e/ou temperatura do sólido tenha uma distribuição uniforme em qualquer instante, de tal modo que, os gradientes de umidade e/ou temperatura do sólido sejam desprezíveis e exclusivamente em função do tempo.

**Figura 1.** Esquema representativo do processo de secagem de um sólido com geometria arbitrária.



Fonte: Lima (2020)

## 2.2. A Modelagem Matemática

### 2.2.1 Equação da transferência de massa

Para prever a transferência de massa no produto poroso vazado e com forma arbitrária, a seguinte equação de conservação de massa é proposta:

$$V \frac{d\bar{M}}{dt} = -h_{m1} S_1 (\bar{M} - \bar{M}_e) - h_{m2} S_2 (\bar{M} - \bar{M}_e) \quad (1)$$

$$V \frac{d\bar{M}}{dt} = -h_{m1} S_1 (\bar{M} - \bar{M}_e) - h_{m2} S_2 (\bar{M} - \bar{M}_e)$$

onde  $\bar{M}$  é o teor de umidade em base seca (kg/kg);  $h_{m1}$  e  $h_{m2}$  são os coeficientes de transferência de massa convectivo externo e interno (m/s), respectivamente;  $V$  é o volume do sólido homogêneo ( $m^3$ );  $S_1$  e  $S_2$  são as áreas superficiais do sólido homogêneo ( $m^2$ ) externa e interna, respectivamente);  $\bar{M}_e$  é o teor de umidade de equilíbrio em base seca (kg/kg), e  $t$  é o tempo (s).

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:

$$\frac{(\bar{M} - \bar{M}_e)}{(\bar{M}_0 - \bar{M}_e)} = \text{Exp} \left[ \left( \frac{-h_{m1}S_1 - h_{m2}S_2}{V} \right) t \right] \quad (2)$$

## 2.2.2 Equação da transferência de calor e massa simultânea

Para a análise da transferência de calor, a seguinte equação é válida:

$$\rho_u V c_p \frac{d\bar{\theta}}{dt} = h_{c1}S_1(\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}) + h_{c2}S_2(\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}) + \rho_s V \frac{d\bar{M}}{dt} [h_{fg} + c_v(\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta})] \quad (3)$$

onde  $\rho_u$  é a massa específica do sólido úmido ( $\text{kg/m}^3$ );  $c_p$  é o calor específico ( $\text{J/kgK}$ );  $\bar{\theta}$  é a temperatura instantânea do sólido (K ou  $^\circ\text{C}$ );  $\bar{\theta}_\infty$  é a temperatura do meio externo (K ou  $^\circ\text{C}$ );  $\bar{\theta}_0$  é a temperatura inicial do sólido (K ou  $^\circ\text{C}$ );  $h_{c1}$  e  $h_{c2}$  são os coeficientes de transferência de calor convectivo externo e interno ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ), respectivamente;  $\rho_s$  é a massa específica do sólido seco ( $\text{kg/m}^3$ );  $c_v$  é o calor específico do vapor ( $\text{J/kgK}$ ) e  $h_{fg}$  é o calor latente de vaporização da água ( $\text{J/kg}$ ).

Desconsiderando a energia necessária para aquecer o vapor d'água desde a temperatura na superfície do sólido até a temperatura do fluido, realizando a substituição das Equações (1) e (2) na Equação (3), usando a condição inicial  $\bar{\theta}(t = 0) = \bar{\theta}_0$ , e resolvendo a equação resultante obtém-se:

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_\infty - \left[ (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}_0) + \left( \frac{b}{a-c} \right) \right] e^{-at} + \left( \frac{b}{a-c} e^{-ct} \right) \quad (4)$$

onde:

$$a = \frac{(h_{c1}S_1 + h_{c2}S_2)}{\rho V c_p} \quad (5)$$

$$b = \frac{\rho_s h_{fg}}{\rho c_p} [(-h_{m1}S_1 - h_{m2}S_2)(\bar{M}_0 - \bar{M}_e)] \quad (6)$$

$$c = \frac{h_{m1}S_1 - h_{m2}S_2}{V} \quad (7)$$

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_{\infty} - \left[ (\bar{\theta}_{\infty} - \bar{\theta}_0) + \left( \frac{b}{a-c} \right) \right] e^{-at} + \left( \frac{b}{a-c} \right) e^{-ct}$$

## 2.3 Aplicação a secagem de tijolos cerâmicos industriais

### 2.3.1 Volume e Área Superficial do Tijolo

A pesquisa foi aplicada para descrever a secagem de tijolos cerâmicos industriais (Figura 2). Para este sólido, as equações para a determinação da área superficial do tijolo, são definidas por:

$$A_c = A_L + A_I \quad (8)$$

onde

$$A_L = 2[(R_x R_z) + (R_x R_y) + (R_y R_z) - 8(a_h a_v)] \quad (9)$$

$$A_I = 16[(a_h R_z) + (a_v R_z)] \quad (10)$$

$$a_h = \frac{R_x - 2a_2 - a_4}{2} \quad (11)$$

$$a_v = \frac{R_y - 2a_1 - 3a_3}{4} \quad (12)$$

onde  $A_c$  é área da superfície total do tijolo,  $A_L$  corresponde à área lateral (faces) dos tijolos,  $A_I$  é área superficial interna (faces internas determinadas pelos furos), e  $a_h$  e  $a_v$  são a altura e a largura de um furo, respectivamente.

O cálculo do volume do tijolo ( $V$ ) foi feito com base no valor das suas dimensões, largura ( $R_x$ ), altura ( $R_y$ ), comprimento ( $R_z$ ), e das dimensões que caracterizam os furos dos tijolos,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , e  $a_4$ , usando as seguintes equações:

$$V = V_T - V_f \quad (13)$$

onde

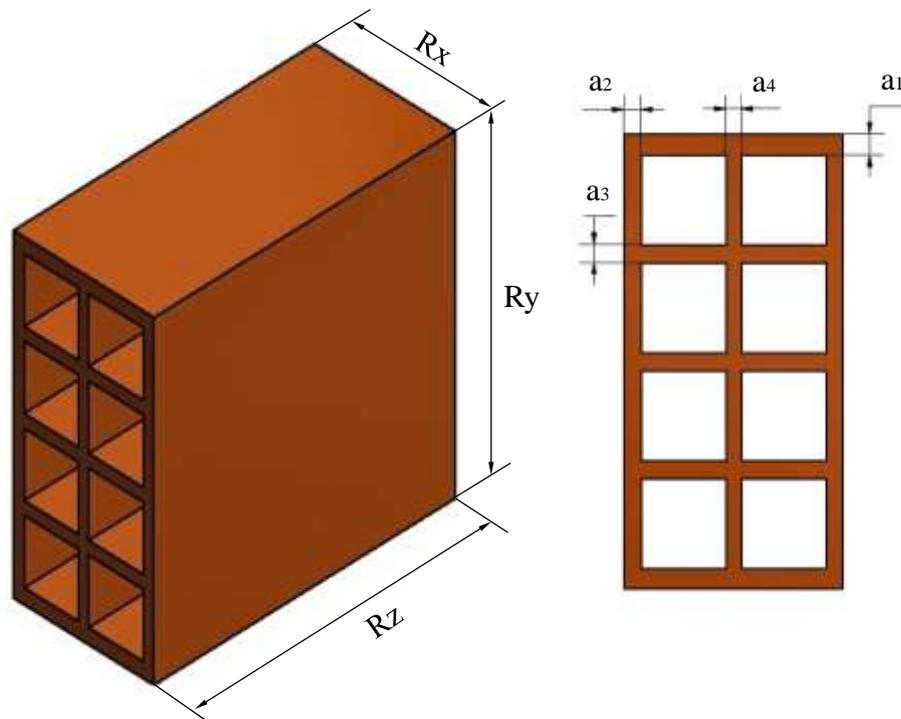
$$V_T = R_x R_y R_z \quad (14)$$

$$V_f = 8a_v a_h R_z \quad (15)$$

onde  $V$  é volume total do tijolo,  $V_T$  o volume do tijolo maciço (com os furos) e  $V_f$  o

volume dos furos.

**Figura 2.** Esquema do tijolo utilizado nos experimentos.



Fonte: Lima (2020)

### 2.3.2 Propriedades termofísicas do ar e água

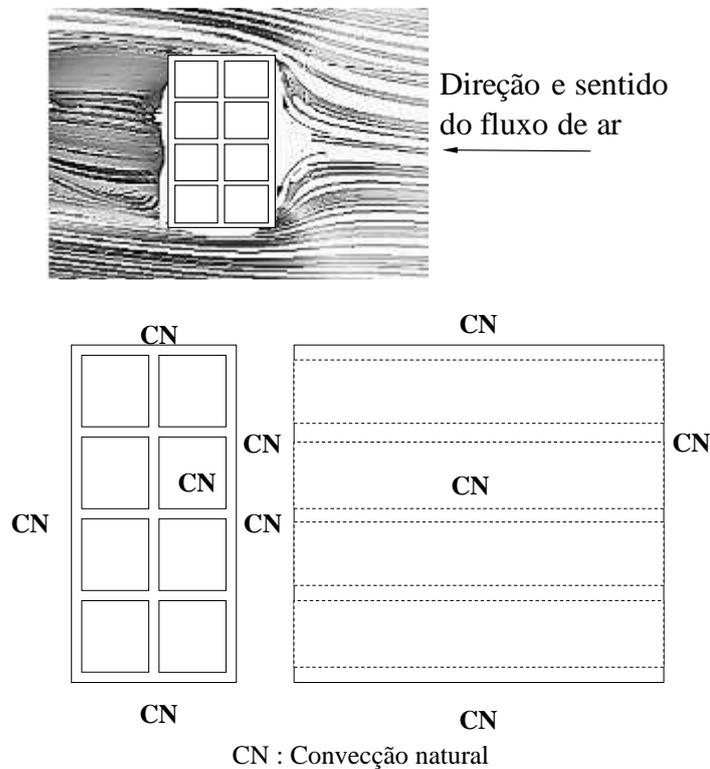
O calor específico do ar, (Pakowski et al., 1991, Jumah et al., 1996), calor latente de vaporização (Pakowski et al., 1991), densidade do ar, temperatura absoluta, constante universal do ar, umidade relativa, pressão de saturação de vapor e pressão atmosférica local (ROSSI, 1987), para cada condição operacional estudada, são determinadas pelas equações reportadas nas referências citadas. Os calores específicos da água nas fases líquidas e vapor são determinados usando equações reportadas por Jumah et al. (1996). Maiores detalhes podem ser encontrados em Lima (2020).

### 2.3.3 Cálculos dos coeficientes de transferência de calor e massa convectivos

Nesta pesquisa foi considerado o tijolo em uma posição lateral ao fluido que escoava na superfície do material, como ilustrado na Figura 3. Para essa situação, dependendo da

velocidade do ar de secagem, o processo de secagem pode ocorrer por convecção natural, forçada ou uma combinação delas em todas as faces externas do tijolo e por convecção natural nas paredes internas do furo.

**Figura 3.** Tijolo com face lateral ao fluxo de ar.



Fonte: Lima (2020)

Na convecção forçada, a tendência de um sistema particular baseia-se matematicamente no número de Reynolds (Re), o qual é a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas. Este parâmetro adimensional é definido como segue:

$$Re_{L_c} = \frac{\rho_a v_a L_c}{\mu_a} \quad (16)$$

Na convecção natural, a tendência de um sistema particular baseia-se matematicamente, no número de Grashof (Gr), o qual é a razão entre o empuxo e as forças viscosas. Este parâmetro adimensional é dado como segue:

$$Gr_{L_c} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^2}{\nu^2} \quad (17)$$

onde  $g$  é a aceleração gravitacional ( $m/s^2$ ),  $\beta = \frac{1}{T_f}$  é o coeficiente de expansão térmica,  $T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$  é a temperatura de película (K),  $L_c$  é o comprimento característico (m),  $T_s$  temperatura da placa (K),  $T_\infty$  é a temperatura do fluido (K),  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  é a viscosidade cinemática ( $m^2/s$ ).

O produto do número de Grashof pelo número de Prandtl (Pr) é denominado número de Rayleigh ( $Ra$ ). Assim, o número de Rayleigh é dado por:

$$Ra_{L_c} = Gr_{L_c} Pr = \frac{\delta\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (18)$$

onde  $Pr = \frac{c_{p,a}\mu_a}{k_a}$ .

As magnitudes relativas dos números de Grashof e Reynolds determina qual forma de convecção domina. Se  $\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$  convecção forçada pode ser desprezada, enquanto se  $\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$  convecção natural pode ser desprezada. Para outras situações, tanto a convecção forçada e a convecção natural devem ser consideradas de forma combinada.

O número de Nusselt médio é da forma:

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}_c L_c}{k_a} \quad (19)$$

Observando a Figura 3, pode-se verificar que o tijolo é composto por placas verticais e horizontais superior e inferior, tanto na superfície externa quanto nos furos, todas em temperatura inferior a do ar de secagem (ar quente). Assim, baseando-se nessa geometria, pode-se determinar os números de Nusselt para transferência de calor e, assim, determinar os coeficientes de transferência de calor e de massa convectivos para cada situação física, de regime de escoamento.

Esta pesquisa limita-se, apenas, a analisar o processo de secagem sob condição de convecção natural. Para convecção natural sobre as superfícies planas, as seguintes correlações empíricas para o número de Nusselt médio são dadas (Incropera & Dewitt, 2002):

a) Placa vertical

$$\overline{Nu}_{pvt} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{[1+(0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (20)$$

onde, no cálculo do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ),  $L_c = Ry$ , para as placas frontal e traseira.

$$\overline{Nu}_{pvl} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{[1+(0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (21)$$

onde, no cálculo do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ),  $L_c = Ry-4[(Ry -2a_1-3a_3)/4]$ , para as placas laterais.

b) Placa horizontal (Superfície superior)

$$\overline{Nu}_{pht} = 0,27(Gr_L Pr)^{1/4}, \quad 10^5 < Gr_L Pr < 10^{11} \quad (22)$$

onde, no cálculo do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ),  $L_c = RxRz/(2Rx+2Rz)$ .

c) Placa horizontal (Superfície inferior)

$$\overline{Nu}_{phi} = 0,54 (Gr_L Pr)^{1/4}, \quad 10^4 < Gr_L Pr < 10^7 \quad (23)$$

$$\overline{Nu}_{phi} = 0,15 (Gr_L Pr)^{1/3}, \quad 10^7 < Gr_L Pr < 10^{11} \quad (24)$$

onde, no cálculo do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ),  $L_c = RxRz/(2Rx+2Rz)$ .

d) Placa vertical (Furo)

$$\overline{Nu}_{pvf} = \left\{ \frac{576}{[Ra_L(L_c/Rz)]^2} + \frac{2,873}{[Ra_L(L_c/Rz)]^{0,5}} \right\}^{-0,5} \quad (25)$$

onde  $L_c = (R_x - 2a_2 - 2a_4)/2$ .

e) Placa horizontal (Furo)

$$\overline{Nu}_{phf} = \left\{ \frac{576}{[Ra_L(L_c/Rz)]^2} + \frac{2,873}{[Ra_L(L_c/Rz)]^{0,5}} \right\}^{-0,5} \quad (26)$$

onde  $L_c = (R_y - 2a_1 - 3a_3)/4$ .

A partir das Equações (20)-(26), foram calculados os coeficientes de transferência de calor convectivo nas superfícies planas externas e do furo do tijolo, usando a seguinte equação:

$$\bar{h}_c = \frac{\overline{Nu}_a k_a}{L_c} \quad (27)$$

A partir da Equação (27) aplicada a cada uma das superfícies plana externa e do furo do tijolo, foram obtidos os coeficientes de transferência de calor convectivo médios externo e interno, como segue:

$$h_{c1} = \bar{h}_{c\ ext} |_{cn} = \left[ \frac{(2\bar{h}_{cpvt} + 2\bar{h}_{cpvl} + \bar{h}_{cphs} + \bar{h}_{cphi})}{6} \right]_{cn} \quad (28)$$

$$h_{c2} = \bar{h}_{c\ int} |_{cn} = \left[ \frac{(\bar{h}_{cpvf} + \bar{h}_{cphf})}{2} \right]_{cn} \quad (29)$$

onde o subscrito cn indica convecção natural.

Uma vez determinados os coeficientes de transferência de calor convectivos externo e interno, foram determinados os coeficientes de transferência de massa convectivos nas superfícies planas externa e do furo do tijolo, usando a analogia de Chilton-Colburn entre transferência de calor e massa, como segue:

$$\bar{h}_m = \frac{\bar{h}_c D_{va} Le^{1/3}}{k_a} \quad (30)$$

onde  $Le = \frac{\alpha}{D_{va}} = \frac{k_a}{D_{va}\rho_a c_{p_a}}$  é o número de Lewis,  $\alpha = \frac{k_a}{\rho_a c_{p_a}}$  é a difusividade térmica do ar, e  $D_{va}$  é o coeficiente de difusão do vapor de água no ar, dado por (Çengel, 2009):

$$D_{va} = 1,87 \times 10^{-10} \frac{T(K)^{2,072}}{P(atm)} \quad (31)$$

A partir da Equação (31) aplicada a cada uma das superfícies planas externa e do furo do tijolo, foram obtidos os coeficientes de transferência de massa convectivo médios externo e interno, como segue:

$$\bar{h}_{m\ ext} |_{cn} = \left[ \frac{(2\bar{h}_{mpvt} + 2\bar{h}_{mpvl} + \bar{h}_{mphs} + \bar{h}_{mphl})}{6} \right]_{cn} \quad (32)$$

$$\bar{h}_{m\ int} |_{cn} = \left[ \frac{(\bar{h}_{mpvf} + \bar{h}_{mphf})}{2} \right]_{cn} \quad (33)$$

Desde que os coeficientes de transferência de calor e massa convectivos, determinados pelas Equações (32) e (33), são calculados com os parâmetros do ar de secagem, e que estes mesmos parâmetros que estão presentes nas Equações (2) e (4), são dependentes dos parâmetros do tijolo, faz-se necessário recalculá-los para esta nova situação física. Isto é feito usando-se as seguintes equações:

$$h_{m1} = \frac{\rho_a (x_{bu} - x_0)}{\rho_s (M_0 - M_e)} \bar{h}_{m\ ext} |_{cn} \quad (34)$$

$$h_{m2} = \frac{\rho_a (x_{bu} - x_0)}{\rho_s (M_0 - M_e)} \bar{h}_{m\ int} |_{cn} \quad (35)$$

onde  $\rho_s$  é a densidade do tijolo,  $x_0$  é a umidade absoluta do ar na temperatura do ar de secagem e  $x_{bu}$  é umidade absoluta do ar na temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, dada por:

$$x_{bu} = \left( \frac{P_{vbu}}{P_{atm} - P_{vbu}} \right) \left( \frac{MM_v}{MM_a} \right) \quad (36)$$

onde  $P_{vbu}$  é a pressão de vapor no ar na temperatura de bulbo úmido do ar (que é igual

a pressão de vapor saturado da água na temperatura d bulbo úmido) e  $\overline{MM}_v$  é o peso molecular do vapor de água.

### 2.3.4 Casos estudados

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas, as informações geométricas (Figura 2), de temperatura e teor de umidade do tijolo, usadas nas simulações. Já a Tabela 3 resume as propriedades termofísicas, áreas superficiais externa e interna, e volume do tijolo, no início do processo.

**Tabela 1.** Parâmetros dimensionais do tijolo cerâmico vazado utilizado na pesquisa.

Parâmetro						
R <sub>x</sub> (mm)	R <sub>y</sub> (mm)	R <sub>z</sub> (mm)	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>4</sub> (mm)
92,8	198,0	202,0	11,7	9,41	8,74	8,0

Fonte: Silva (2009)

**Tabela 2.** Dados iniciais e finais do tijolo usados na pesquisa.

Parâmetro			
M <sub>0</sub> (b.s)	M <sub>f</sub> (b.s)	M <sub>e</sub> (b.s)	θ <sub>0</sub> (°C)
0,16903	0,00038	0,00038	26,1

Fonte: Silva (2009)

**Tabela 3.** Parâmetros termofísicos e geométricos do tijolo usados na simulação.

Parâmetros						
K (W/mK)	ρ <sub>u</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	c <sub>p</sub> (J/kgK)	S <sub>1</sub> (mm <sup>2</sup> )	S <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )
0,833	1754,88	1889,95	545,00	134651,775	226514,720	1734026,095

Fonte: Lima (2020)

Para verificar a aplicação do modelo matemático à secagem de tijolos industriais, foram definidos 6 casos para simulação (Tabela 4). A ideia está direcionada para a avaliação do efeito temperatura do ar de secagem, na remoção de umidade e temperatura do tijolo ao longo da secagem.

**Tabela 4.** Condições do ar e tijolo usadas nas simulações de secagem.

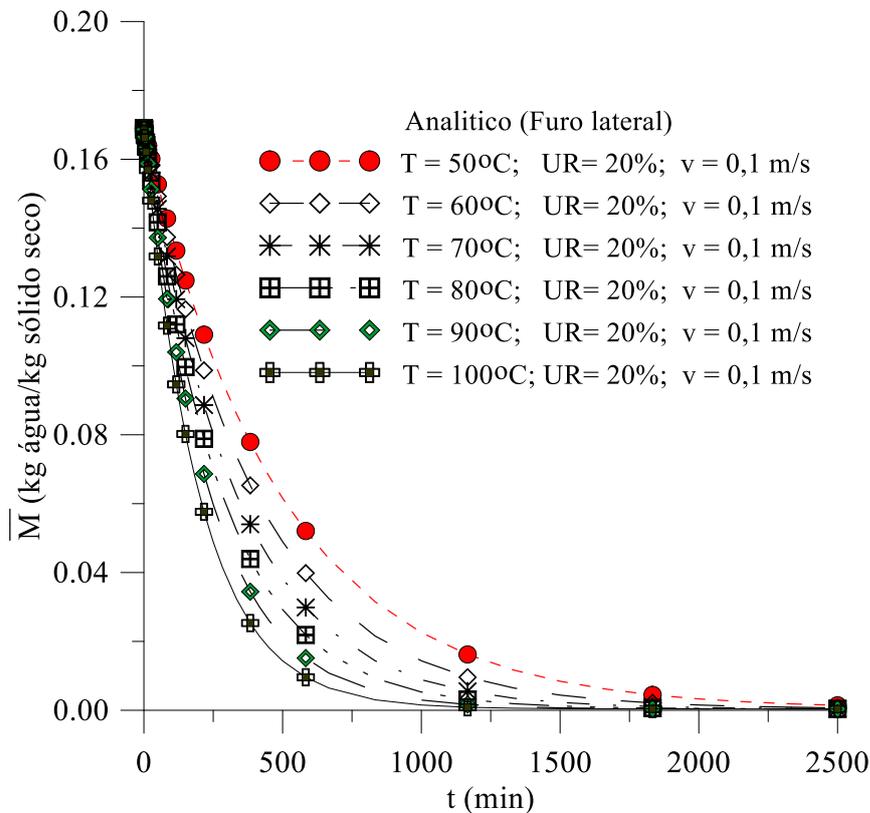
Caso	Ar				
	$T_{\infty}$ (°C)	UR (%)	v (m/s)	$T_{bu}$ (°C)	$x_0$ (kg/kg)
	50	20	0,1	28,40	0,01554
	60	20	0,1	34,91	0,02548
	70	20	0,1	41,59	0,04079
	80	20	0,1	48,42	0,06417
	90	20	0,1	55,39	0,09992
	100	20	0,1	62,46	0,15550

Fonte: Dados da pesquisa.

### 3. Resultados e Discussão

Na Figura 4 estão ilustradas as cinéticas de secagem do tijolo cerâmico industrial, em diferentes temperaturas do ar de secagem, mantidos constantes a umidade relativa e velocidade do ar (Casos 1 a 6, da Tabela 4). De uma análise desta figura verifica-se que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápido o sólido seca e, com isso, tem-se uma redução no tempo de secagem, para se atingir um teor de umidade previamente especificado. Para ter uma ideia, em  $t = 500$  minutos (8,33 h) de processo, o teor de umidade médio do tijolo é de 0,06156 e 0,01433 kg/kg (base seca), para as temperaturas de 50 e 100°C, respectivamente.

**Figura 4.** Teor de umidade médio do tijolo cerâmico industrial em função do tempo para diferentes temperaturas do ar de secagem. Fonte: Dados da pesquisa.



Fonte: Dados da pesquisa.

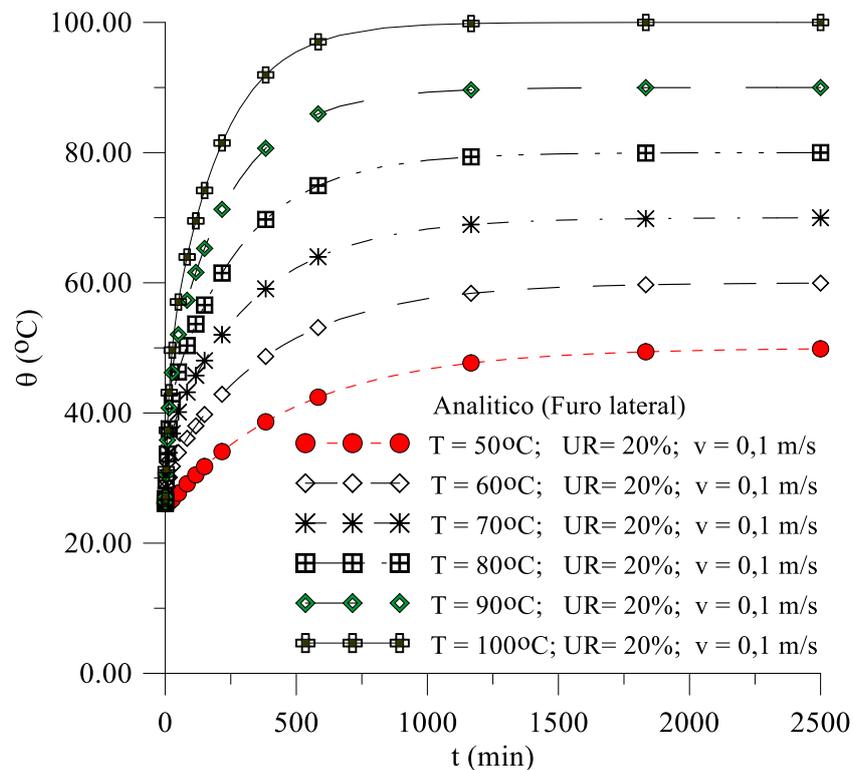
Na Figura 5 ilustram-se as cinéticas de aquecimento do tijolo cerâmico industrial, em diferentes temperaturas do ar de secagem, mantidos constantes a umidade relativa e velocidade do ar. De uma análise desta figura verifica-se que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápido o sólido se aquece. Para ter uma ideia, em  $t = 500$  minutos (8,33 h) de processo, a temperatura do tijolo é de 41,03 e 95,49°C para as temperaturas de 50 e 100°C, respectivamente.

Vale salientar que taxa de remoção de umidade e aquecimento mais elevadas pode provocar problemas na estrutura do tijolo tais como, deformações acentuadas, fissuras e fraturas, que reduzem significativamente a qualidade do produto ao final do processo de secagem. Certamente, produtos com defeitos provenientes da secagem, ao serem submetidos a queima, poderá vir a serem inutilizados, o que gera perda de material, afeta o meio ambiente e aumenta os custos do processo de manufatura destes produtos.

A Tabela 5 resume os valores dos coeficientes de transferência de calor e massa convectivos obtidos em diferentes condições de secagem (Casos 1 a 6). Dá análise desta

tabela verifica-se que, tanto o coeficiente de transferência de massa convectivo, quanto o coeficiente de transferência de calor convectivo, aumenta com o aumento da temperatura do ar de secagem. Seus valores são pequenos, típicos de um problema de convecção natural mássica e térmica. Isto pode ser comprovado pelos altos valores da relação entre os números de Grashof e de Reynolds ( $\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$ ), de tal forma que os efeitos de convecção forçada são desprezíveis. Um fato interessante é que os coeficientes de transferência de calor e de massa convectivos no furo do tijolo são levemente menores que aqueles na superfície externa do tijolo. Isto ocorre devido ao fato de a área superficial de troca de calor e massa, em cada furo, ser menor do que aquela da região externa do tijolo.

**Figura 5.** Temperatura no vértice do tijolo cerâmico industrial em função do tempo para diferentes temperaturas do ar de secagem. Fonte: Dados da pesquisa.



Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 5.** Coeficientes de transporte de calor e massa convectivo para diferentes temperaturas do ar de secagem.

Condição do ar de secagem			Parâmetro convectivo de transferência de massa		Parâmetro convectivo de transferência de calor		Gr/Re <sup>2</sup> (-)
T (°C)	UR (%)	v (m/s)	hm <sub>1</sub> (m/s)	hm <sub>2</sub> (m/s)	hc <sub>1</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	hc <sub>2</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	
50	20	0,1	1,67×10 <sup>-7</sup>	1,59×10 <sup>-7</sup>	5,34	5,11	3941,51
60	20	0,1	2,05×10 <sup>-7</sup>	1,96×10 <sup>-7</sup>	5,51	5,26	4460,47
70	20	0,1	2,46×10 <sup>-7</sup>	2,35×10 <sup>-7</sup>	5,64	5,39	4922,64
80	20	0,1	2,91×10 <sup>-7</sup>	2,78×10 <sup>-7</sup>	5,75	5,49	5335,42
90	20	0,1	3,43×10 <sup>-7</sup>	3,28×10 <sup>-7</sup>	5,84	5,58	5703,88
100	20	0,1	4,10×10 <sup>-7</sup>	3,92×10 <sup>-7</sup>	5,91	5,66	6037,75

Fonte: Dados da pesquisa.

Vale salientar que, na indústria, a umidade média encontrada nos tijolos cerâmicos, no final da etapa de secagem, atinge valores entre 3 e 4% (base úmida) e o tempo de processo é em torno de 24 horas, para a secagem sendo realizada em secador tipo túnel de fluxos cruzados. A Tabela 6 resume os resultados que atendem as condições do teor de umidade final estabelecidas pelo setor industrial, para cada condição de secagem estudada.

**Tabela 6.** Condições do tijolo ao final do processo de secagem.

Caso	Ar			Tijolo		
	T <sub>∞</sub> (°C)	UR (%)	v (m/s)	M (kg/kg)	θ b(°C)	t (min)
1	50	20	0,1	0,03151	45,44	833,33
2	60	20	0,1	0,03244	54,41	666,67
<b>3</b>	<b>70</b>	<b>20</b>	<b>0,1</b>	<b>0,03822</b>	<b>62,29</b>	<b>500,00</b>
4	80	20	0,1	0,03480	71,88	450,00
5	90	20	0,1	0,03000	81,88	416,67
6	100	20	0,1	0,03239	89,65	333,33

Fonte: Dados da pesquisa.

Assim, avaliando os resultados reportados na Tabela 6, considerando o teor de umidade final máximo de 3 a 4% (base seca) e a temperatura do tijolo, posição do tijolo com furo perpendicular ao fluxo de ar, tempo de secagem nessas condições de umidade, bem como os resultados experimentais (em termos de qualidade do tijolo durante a secagem)

apresentados por SILVA (2009), sugere-se como uma condição ótima de secagem  $T= 70^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{UR}= 20\%$  e  $v= 0,1 \text{ m/s}$ .

Como um comentário final e, devido à importância do tema para o setor ceramista e economia do país, sugere-se, como continuidade desta pesquisa, a aplicação do modelo a outros materiais cerâmicos e a avaliação do efeito de novas condições operacionais do ar de secagem sobre a secagem do tijolo industrial, com vista à otimização do processo, em termos de energia gasta e qualidade do produto, pós-secagem.

#### 4. Conclusões

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) A modelagem matemática fenomenológica baseada numa análise concentrada para prever as transferências de massa e calor em tijolos cerâmicos, vazados e com forma arbitrária, foi adequada;
- b) Quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar de secagem mais rápido o tijolo perde umidade e eleva sua temperatura, que pode provocar defeitos no produto pós-secagem, reduzindo sua qualidade para a etapa de queima;
- c) Os coeficientes de transferência de calor e massa na superfície externa e no furo do tijolo são diferentes, sendo mais elevados na superfície externa;
- d) O coeficiente de transferência de massa na superfície externa do tijolo variou de  $1,67 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  na condição de secagem  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $20\%$ ,  $0,1 \text{ m/s}$  até  $4,10 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $20\%$ ,  $0,1 \text{ m/s}$ . Já o coeficiente de transferência de massa no furo do tijolo variou de  $1,59 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  na condição de secagem  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $20\%$ ,  $0,1 \text{ m/s}$  até  $3,92 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $20\%$ ,  $0,1 \text{ m/s}$ .
- e) O coeficiente de transferência de calor na superfície externa do tijolo variou de  $5,34 \text{ W/m}^2\text{K}$  na condição de secagem  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $20\%$ ,  $0,1 \text{ m/s}$  até  $5,91 \text{ W/m}^2\text{K}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $20\%$ ,  $0,1 \text{ m/s}$ , enquanto que o coeficiente de transferência de calor no furo do tijolo variou de  $5,11 \text{ W/m}^2\text{K}$  na condição de secagem  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $20\%$ ,  $0,1 \text{ m/s}$  até  $5,66 \text{ W/m}^2\text{K}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $20\%$ ,  $0,1 \text{ m/s}$ .
- f) Tomando por base o teor de umidade final máximo de 3 a 4% (base seca), utilizado na indústria, a temperatura do tijolo, posição do tijolo com furo perpendicular ao fluxo de ar, tempo de secagem nessas condições de umidade, e resultados experimentais (em termos de qualidade do tijolo durante a secagem) apresentados por SILVA (2009), propõe-se como uma condição ótima de secagem  $T= 70^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{UR}= 20\%$  e  $v= 0,1 \text{ m/s}$ .

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ-PB, Termo no 324/19), CAPES, CNPq e FINEP, pelo apoio financeiro e aos pesquisadores citados neste trabalho.

## **Referências**

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. Informações técnicas - Definição e Classificação. 2017. Recuperado de: <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 18 de Maio 2020.

Almeida, G. S.; Cavalcante, F. J. N.; Lima, A. G. B. (2003) Transporte de calor e massa em sólidos heterogêneos: um estudo teórico via análise concentrada. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, 5(1), 1–16. Recuperado de: <http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev51/Art5111.pdf>

Alvarez De Buergo, M.; Limon, T. G. (1994) Restauracion de Edificios Monumentales. Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Publicas, ISBN 84-7790-203-8

Oliveira, A. D. (2018) Transporte de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos vazados. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB, Braisl. Recuperado de: <https://ppgem.ufcg.edu.br/arquivos/2018/DANIEL%20OLIVEIRA%20AVELINO%202018.pdf>

Bustamante, G. M.; Bressiani, J. C. (2000) A Indústria Cerâmica Brasileira. Cerâmica Industrial. 5(3), 31-36. Recuperado de: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657067f8c9d6e028b4623/pdf/ci-5-3-587657067f8c9d6e028b4623.pdf>

Cabral Junior, M.; Motta, J. F. M.; Almeida, A. S.; Tanno, L.C. (2008) RMIs: argila para cerâmica vermelha. IN: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI.

Çengel, Y. A. (2009) Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática. 3ª edição. McGraw Hill Interamericana do Brasil Ltda. São Paulo.

Gomez, R. S.; Magalhães, H. L. F.; Porto, T. R. N.; Lima, E. S.; Santana, R. A. C.; Gomes, K. C.; Lima, W. M. P. B.; Lima, A. G. B. (2020) Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão. Research, Society and Development, 9, 1-37. doi: 10.33448/rsd-v9i11.10300

Incropera, F. P.; De Witt, D. P. (2002) Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley & Sons.

Jumah, R. Y.; Mujumdar, A. S.; Raghavan, G. S. V. (1996) A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. Drying Technology, 14, (3-4), 765-802. doi: 10.1080/07373939608917124

Lima, A. G. Barbosa de.; J. M. P. Q. Delgado.; L. P. C. Nascimento.; E. S. de Lima.; V. A. B. de Oliveira.; A. m. v. Silva.; J. V. Silva. (2020a) Clay Ceramic Materials: From Fundamentals and Manufacturing to Drying Process Predictions. Transport Process and Separation Technologies. 133. 1 – 29. doi: 10.1007/978-3-030-47856-8\_1

Lima, E. S.; Lima, W. M. P. B.; Lima, A. G. B.; De Farias Neto, S. R.; Silva, E. G.; Oliveira, V. A. B. (2018) Advanced Study to Heat and Mass Transfer in Arbitrary Shape Porous Materials: Foundations, Phenomenological Lumped Modeling and Applications. Advanced Structured Materials. 1ed. Heidelberg (Germany): Springer International Publishing.

Lima, W. M. P. B.; Silva, E. H.; Lima, E. S.; Gomez, R. S.; Magalhães, H. L. F.; Silva, S. K. B. M.; Porto, T. R. N.; Lima, A. G. B. (2020b) Secagem de materiais cerâmicos argilosos com forma complexa: uma análise teórica usando o método da capacitância global. Research, Society and Development, 9, 1-23. doi: 10.33448/rsd-v9i11.10362

Lima, W. M. P. B.; Lima, E. S.; Lima, A. R. C.; Oliveira Neto, G. L.; Oliveira, N. G. N.; Farias Neto, S. R.; Lima, A. G. B. (2020c) Applying Phenomenological Lumped Models in

Drying Process of Hollow Ceramic Materials. Defect And Diffusion Forum, 400, 135-145.  
doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.400.135

Lima, W. M. P. B. (2014) Transferência de Calor e Massa em Materiais Cerâmicos com Forma Complexa Via Método da Capacitância Global. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, Brasil. Recuperado de: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/930>

Lima, E. S. (2020) Transferência de calor e massa em tijolos cerâmicos industriais via análise concentrada e estimativa de parâmetros do processo de secagem. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande- PB, Brasil.

Nascimento, L. P. C.; Silva, S. K. B. M.; Lima, E. S.; Magalhães, H. L. F.; Lima, W. M.P. B.; Gomez, R. S.; Porto, T. R. N.; Lima, A. G. B. (2020) Secagem de tijolos cerâmicos argilosos industriais: uma investigação teórica usando modelos concentrados. Research, Society and Development, 9 (11), 1-31. doi: 10.33448/rsd-v9i11.10064

Pakowski, Z.; Bartczak, Z.; Strumillo, C.; Stenstrom, S. (1991) Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in CAD of drying processes. Drying Technology. 9(3), 753-773. doi: 10.1080/07373939108916708

Pereira A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. Editora UAB/NTE/UFSM, Santa Maria/RS. Recuperado de [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic\\_Computacao\\_MetodologiaPesquisaCientifica.pdf?sequence=1](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_MetodologiaPesquisaCientifica.pdf?sequence=1).

Rossi, S. J. (1987) Psicrometria. João Pessoa: FUNAPE.

Sahu, K. M.; Singh L.; Choudhary, S. N. (2016) Critical Review on Bricks. International Journal of Engineering and Management Research. 6(5) 1-9. ISSN: 2250-0758.

Silva, J. B.; Almeida, G. S.; Lima, W. M. 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. doi:  
10.4028/www.scientific.net/DDF.312-315.971

Silva, J. B. (2009) Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande- PB, Brasil. Recuperado de:  
file:///C:/Users/horte/Downloads/JOSELITO%20BARBOSA%20DA%20SILVA%20-%20TESE%20PPGEP%202009..pdf

Silva, V. S. (2016) Transferência de calor e massa em materiais com forma complexa via método da análise concentrada. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, Brasil. Recuperado de: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/930>

Silva, V. S.; Delgado, J. M. P. Q.; Barbosa De Lima, W. M. P.; Barbosa De Lima, A.G. (2016) Heat and mass transfer in holed ceramic material using lumped model. Diffusion Foundations, 7, 30-52. doi: 10.4028/www.scientific.net/DF.7.30

#### **Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Elisiane Santana de Lima – 12,5%

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 12,5%

Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva – 12,5%

Hortência Luma Fernandes Magalhães – 12,5%

Lucas Pereira Castanheira Nascimento – 12,5%

Ricardo Soares Gomez – 12,5%

Túlio Rafael Nascimento Porto – 12,5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima – 12,5%