

Estimação de parâmetros do processo de secagem de tijolos cerâmicos industriais via modelo de análise concentrada

Parameters estimation of the drying process of industrial ceramic bricks via concentrated analysis model

Estimación de los parámetros del proceso de secado de ladrillos cerámicos industriales mediante modelo de análisis concentrado

Recebido: 07/06/2021 | Revisado: 15/06/2021 | Aceito: 17/06/2021 | Publicado: 02/07/2021

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

Carlos José de Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8939-0946>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: carlos.araujo@ufcg.edu.br

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

A fabricação dos materiais cerâmicos, como atividade industrial, se deu em função do crescimento das grandes construções civis. A manufatura desses materiais compreende as etapas de extração, beneficiamento, homogeneização, conformação, secagem e queima. A secagem é um processo termodinâmico que antecede a queima, na qual, em função do fornecimento de energia térmica, ocorre a evaporação da água que foi adicionada ao sólido durante a sua conformação. É um processo que envolve fenômenos complexos de transferência de calor e massa e, por isso requer a geração de modelos matemáticos que descrevam o processo com grande realismo físico. A existência dos modelos matemáticos se dá, sobretudo, com o intuito de descrever determinados fenômenos, buscando entender e solucionar irregularidades existentes durante o processo. A estimação de parâmetros é uma técnica que possibilita a obtenção das variáveis de controle de processo e a descrição do fenômeno de secagem com precisão. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo, através da modelagem matemática e simulação numérica, analisar o comportamento térmico e gravimétrico de tijolos cerâmicos industriais durante o processo de secagem e estimar os parâmetros de processo. Para isso, modelos matemáticos baseados no método de análise concentrada foram propostos e ajustados aos dados experimentais obtidos na literatura, via software Statística®. Resultados referentes ao comportamento dos tijolos cerâmicos durante o processo de secagem, foram expostos e analisados. Foi possível concluir que o modelo matemático proposto ajustou-se adequadamente aos dados experimentais coletados, com coeficiente de determinação superior à 0.9 e que, através da estimação de parâmetros, foi possível definir as variáveis de controle do processo, e obter os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa.

Palavras-chave: Calor; Estimação de parâmetros; Massa; Modelagem matemática; Tijolos cerâmicos.

Abstract

The manufacture of ceramic materials, as an industrial activity, was due to the growth of large civil constructions. The manufacture of these materials comprises the stages of extraction, processing, homogenization, conformation, drying and firing. Drying is a thermodynamic process that precedes firing, in which, due to the supply of thermal energy, the water that was added to the solid during its formation evaporated. It's a process that involves complex phenomena of heat and mass transfer and, therefore, requires the generation of mathematical models that describe the process with great physical realism. The existence of mathematical models occurs, above all, with the aim of describing certain phenomena, seeking to understand and solve irregularities that exist during the process. Parameter estimation is a technique that makes it possible to obtain process control variables and accurately describe the drying phenomenon. In this context, the present study aimed, through mathematical modeling and numerical simulation, to analyze the thermal and gravimetric behavior of industrial ceramic bricks during the drying process and to estimate the process parameters. For this, mathematical models based on the concentrated analysis method were proposed and adjusted to experimental data obtained in the literature, via Statística® software. Results regarding the behavior of ceramic bricks during the drying process were exposed and analyzed. It was possible to conclude that the proposed mathematical

model adequately adjusted to the collected experimental data, with a coefficient of determination greater than 0.9 and that, through parameter estimation, it was possible to define the process control variables and obtain the convective transfer coefficients of heat and mass.

Keywords: Ceramic bricks; Heat; Mass; Mathematical modeling; Parameter estimation.

Resumen

La fabricación de materiales cerámicos, como actividad industrial, se debió al crecimiento de las grandes construcciones civiles. La fabricación de estos materiales comprende las etapas de extracción, procesamiento, homogeneización, conformación, secado y quemado. El secado es un proceso termodinámico que precede a la combustión, en el cual, debido al aporte de energía térmica, el agua que se agregó al sólido durante su formación se evapora. Es un proceso que involucra fenómenos complejos de transferencia de calor y masa y, por tanto, requiere la generación de modelos matemáticos que describan el proceso con gran realismo físico. La existencia de modelos matemáticos se da, sobre todo, con el objetivo de describir determinados fenómenos, buscando comprender y solucionar las irregularidades que existen durante el proceso. La estimación de parámetros es una técnica que permite obtener variables de control del proceso y describir con precisión el fenómeno de secado. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo, a través de la modelización matemática y la simulación numérica, analizar el comportamiento térmico y gravimétrico de los ladrillos cerámicos industriales durante el proceso de secado y estimar los parámetros del proceso. Para ello, se propusieron modelos matemáticos basados en el método de análisis concentrado y se ajustaron a los datos experimentales obtenidos en la literatura, a través del software Statistica®. Se expusieron y analizaron resultados sobre el comportamiento de los ladrillos cerámicos durante el proceso de secado. Se pudo concluir que el modelo matemático propuesto se ajustó adecuadamente a los datos experimentales recolectados, con un coeficiente de determinación mayor a 0.9 y que, a través de la estimación de parámetros, fue posible definir las variables de control del proceso y obtener los coeficientes de transferencia convectiva de calor y masa.

Palabras clave: Calor; Estimación de parámetros; Ladrillos cerámicos; Masa; Modelado matemático.

1. Introdução

Há indícios de atividade cerâmica em quase todos os povos da antiguidade. Sendo encontrada dando vida à belíssimas peças e artefatos úteis, as cerâmicas são utilizadas há milênios, cerca de milhares de anos antes da Era Cristã (Perez-Monserrat et al., 2016; Anfacer, 2018). Com o passar dos anos, diversos produtos utilizados em construções foram desenvolvidos, dentre eles, o tijolo. Com a expansão na área da construção civil, a fabricação de peças cerâmicas evoluiu de uma atividade artesanal para uma atividade de cunho industrial; para muitos, a cerâmica é considerada a mais antiga das indústrias (S. Silva, 2018).

Os materiais cerâmicos, em especial os utilizados na indústria civil, ocupam lugar de destaque na economia do Brasil. Segundo Prado & Bressiani (2013), nas últimas décadas, a indústria ceramista brasileira apresentou um intenso crescimento devido à expansão da construção civil no país. Entretanto, embora ocupe um lugar importante na economia, a fabricação de produtos cerâmicos, em especial a cerâmica vermelha, que é bastante empregada na construção civil, apresenta um déficit tecnológico, o qual é muito característico de empresas de pequeno e médio porte.

A indústria ceramista engloba uma série de processos e matérias primas distintas que dão origem à diversos produtos. Trata-se de um segmento que integraliza o setor de produtos não metálicos da indústria de transformação, onde a cerâmica vermelha é o elemento mais representativo. Sendo um segmento bastante diversificado, o processamento da cerâmica vermelha é uma atividade de base que produz diferentes produtos, tais como: telhas, tijolos, blocos, manilhas, lajes e pisos (Bustamante & Bressiani, 2000; A. Silva, 2018; Junior et al., 2019).

Constituindo-se de inúmeras indústrias que se diferem em função do progresso tecnológico e capacidade produtiva, o ramo da cerâmica vermelha, dispõe de um processo de fabricação comum para todos os seus produtos, contando com etapas como a exploração de jazidas, beneficiamento, homogeneização, conformação, secagem e queima (L. Silva et al., 2013; Brito, 2016; A. Silva et al., 2017).

Dentre todas as etapas do processo de fabricação, a secagem tornou-se uma das mais importantes na produção de peças cerâmicas. Usualmente, define-se a secagem como um processo térmico, durante o qual, têm-se a remoção da umidade mediante o fornecimento de energia, a fim de obter-se um produto seco. Trata-se de um dos processos mais antigos e triviais

que tem como principal objetivo, além da remoção do teor de umidade, a obtenção de um custo mínimo de consumo de energia, já que, tempo de secagem, qualidade da peça final e consumo energético são parâmetros que necessitam de atenção (Akyol et al., 2013).

Afere-se que, no cenário de produção atual, a indústria da cerâmica vermelha apresenta um processo de grande consumo energético e impacto ambiental. Por tratar-se de um processo complexo que envolve, de forma simultânea, as transferências de calor e massa, é comum que, durante a secagem, ocorram fenômenos que ocasionem danos estruturais às peças cerâmicas, comprometendo, assim, o desempenho e qualidade das mesmas, promovendo um grande descarte de produtos. Deste modo, controlar o processo de secagem, ou seja, ter conhecimento prévio e compreensão acerca dos mecanismos envolvidos neste processo, é de extrema valia para a indústria cerâmica (Sander et al., 2003; V. Silva, 2016; Santos, 2018; J. Nascimento et al., 2019).

É sabido que a modelagem matemática permite descrever determinados fenômenos, auxiliar no entendimento dos mesmos, e aperfeiçoar os processos que os envolvem, de modo que as irregularidades existentes no processo possam ser reduzidas ou até mesmo extintas. Neste sentido, o uso da modelagem matemática e simulação numérica para descrever o processo de secagem tem se mostrado promissor quando comparada as investigações à nível de laboratório, visto que a criação de códigos computacionais torna possível prever a secagem com rapidez e controlar o processo, permitindo assim, uma otimização na produção, de forma que se reduza as perdas e diminua-se o custo, ao evitar o desperdício de matérias primas. Em vista disso, a fim de descrever numericamente a taxa de perda de umidade em produtos cerâmicos, vários modelos matemáticos têm sido propostos; todavia, ainda são modelos matemáticos que necessitam de melhoramento em função do tipo de produto estudado (Faustino, 2016; Araújo et al., 2020).

Comumente, os modelos matemáticos propostos para descrever o processo de secagem não levam em consideração as variáveis operacionais, tratando-se apenas de modelos empíricos. Além disso, poucos são os estudos que conciliam a modelagem matemática e simulação numérica com o intuito de estimar os parâmetros de controle de processo da secagem. A ideia é considerar produtividade, qualidade e desempenho. Através da estimativa de parâmetros do processo de secagem é possível controlar a secagem, minimizar o consumo energético, projetar os sistemas para que funcionem de forma adequada e obter peças finais de melhor qualidade. Além disso, vale salientar que um estudo detalhado da secagem de materiais cerâmicos aumenta a eficiência deste setor, tendo em vista que a diminuição das perdas e deterioração da qualidade da peça final, propicia um ambiente favorável a um desenvolvimento sustentável.

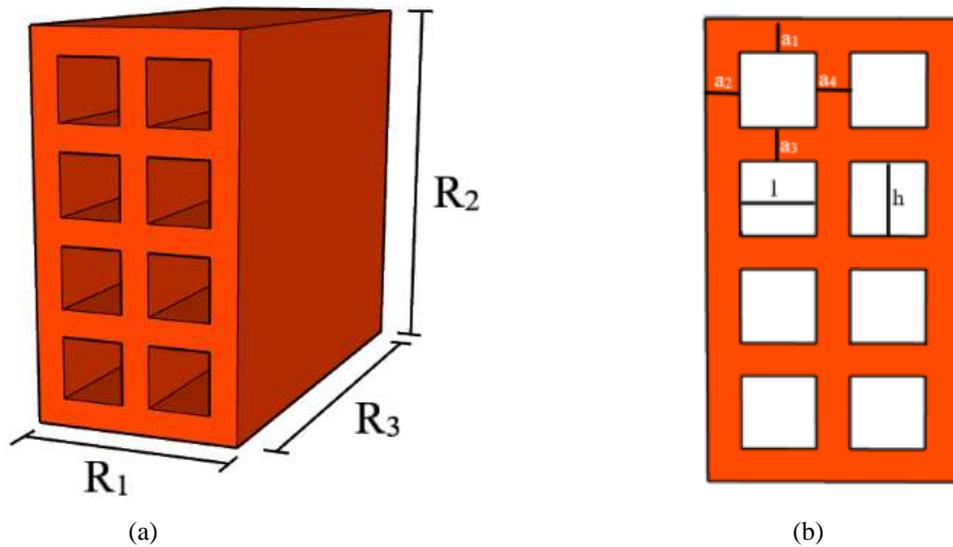
Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo estudar numericamente a transferência de calor e massa simultânea em tijolos cerâmicos industriais, visando a otimização e controle do processo de secagem, através da estimação de parâmetros, utilizando o método de análise concentrada. O aspecto inovador da pesquisa está relacionado com o uso de um modelo fenomenológico para descrever o processo de secagem de tijolos, com dimensões industriais (tijolos de 8 furos), comumente usados na construção de alvenaria (muros, casas, edifícios etc.).

2. Metodologia

Problema Físico e a Geometria

O presente estudo apresenta uma abordagem numérica do processo de secagem de tijolos cerâmicos industriais. Trata-se da modelagem matemática e simulação numérica, na qual, para descrever este processo, utilizou-se de modelos concentrados que consideram os balanços de energia e massa para o ar de secagem e para o tijolo cerâmico. Na Figura 1 está ilustrado o tijolo cerâmico industrial estudado nessa pesquisa e suas dimensões geométricas. Trata-se de um tijolo vazado, com 8 furos retangulares, de geometria paralelepípedica.

Figura 1. Geometria do tijolo cerâmico industrial: (a) Vista 3D; e (b) Vista frontal (2D).



Fonte: Dados da Pesquisa.

Modelagem Matemática

De acordo com L. Nascimento et al. (2020), o nível de compreensão do processo de secagem de sólidos depende, sobretudo, do tipo de análise utilizada. Os modelos de análise concentrada expressam as taxas de transferência de calor e massa para o produto, com o tempo de processo, ignorando a resistência interna existente para essa transferência. Por outro lado, os modelos distribuídos se contrapõem, expressando as taxas de transferência como uma função da posição dentro do produto e do tempo de secagem, considerando as resistências externa e interna aos fluxos de calor e massa.

No presente estudo, abordou-se a utilização do modelo de análise concentrada. Para descrever o processo de secagem de tijolos através da modelagem matemática proposta, algumas hipóteses foram consideradas:

- a) As propriedades mecânicas e termofísicas do tijolo são constantes;
- b) A água, em sua forma líquida, migra do interior do sólido evaporando em sua superfície;
- c) A geração interna de massa e calor é desprezível;
- d) O tijolo é constituído de água na fase líquida e matéria sólida;
- e) As variações dimensionais foram consideradas desprezíveis, isto é, o processo ocorre a volume e área superficial constantes.

a) Análise da Transferência de Massa

Assumindo uma condição convectiva, o modelo do balanço de massa pode ser dado da seguinte forma:

$$V \frac{dM}{dt} = -h_m S (M - M_e) + \dot{M}V \quad (1)$$

onde, V representa o volume do tijolo; h_m refere-se ao coeficiente de transferência de massa convectivo; S trata-se da área total do tijolo (área superficial externa e área interna); M e M_e são o teor de umidade no tempo t e teor de umidade de equilíbrio, respectivamente; t é o tempo e \dot{M} refere-se a geração de massa no interior do tijolo.

Ao considerar como condição inicial: $M=M_0$ em $t=0$, e que não há geração de massa no interior do tijolo, pode separar as variáveis e integrar ambos os lados da equação, chegando ao seguinte resultado:

$$\frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)} = \text{Exp} \left(-\frac{h_m S}{V} t \right) \quad (2)$$

Reorganizando, encontra-se a equação que define a transferência de massa:

$$M = \left[(M_0 - M_e) \text{Exp} \left(-\frac{h_m S}{t} \right) \right] + M_e \quad (3)$$

b) Análise da Transferência de Calor

De modo análogo à transferência de massa, para análise da transferência de calor, assume-se que na superfície do tijolo ocorre a convecção térmica, a evaporação e o aquecimento do vapor produzido, todos de forma simultânea. Logo, têm-se o seguinte balanço de energia:

$$\rho V C_p \frac{d\theta}{dt} = \left\{ h_c (\theta_\infty - \theta) + \frac{\rho_s V dM}{S dt} [h_{fg} + C_v (\theta_\infty - \theta)] \right\} S + \dot{q} V \quad (4)$$

onde, ρ é a densidade do tijolo; V refere-se ao volume total do tijolo e S a área total (áreas superficiais externa e interna); C_p é o calor específico do tijolo; h_c corresponde ao coeficiente de transferência de calor convectivo; θ_∞ e θ são as temperaturas do meio externo e do tijolo em qualquer instante t do processo, respectivamente; ρ_s trata-se da massa específica do tijolo seco, h_{fg} é o calor latente de vaporização da água livre; C_v é o calor específico do tijolo; e \dot{q} corresponde à geração interna de calor.

Considerando $\theta = \theta_0$ em $t = 0$ como condição inicial, que $\frac{dM}{dt} = 0$, uma vez que desconsidera-se a transferência de massa simultânea, e que não há geração interna de calor, ao separar-se as variáveis, integrando ambos os lados da equação, obtém-se:

$$\frac{(\theta_\infty - \theta)}{(\theta_\infty - \theta_0)} = \text{Exp} \left[-\left(\frac{h_c S}{\rho V C_p} \right) t \right] \quad (5)$$

Reorganizando as variáveis, obtém-se a equação que define a transferência de calor:

$$\theta = \theta_\infty - (\theta_\infty - \theta_0) \text{Exp} \left[-\left(\frac{h_c S}{\rho V C_p} \right) t \right] \quad (6)$$

Estimação de Parâmetros de Processo e Aplicação à Tijolos Industriais

Neste estudo, com o intuito de verificar a aplicação do modelo matemático de análise concentrada à tijolos cerâmicos industriais, foram utilizados os dados experimentais de secagem em estufa (dados dimensionais, teor de umidade e temperatura de superfície), reportados por J. Silva (2009), em sua investigação experimental. Trata-se de um estudo teórico, de caráter predominantemente quantitativo, baseado em pesquisas reportadas na literatura (J. Silva, 2009; S. Silva, 2018; Pereira et al., 2018).

Em sua pesquisa, J. Silva (2009) cita que, antes de submeter os tijolos cerâmicos ao processo de secagem em estufa, foram realizadas aferições da temperatura e massa do tijolo cerâmico, da umidade relativa, temperatura e velocidade do ar de secagem, bem como foram realizadas medições referentes às dimensões do sólido. Com o auxílio dos dados dimensionais reportados por J. Silva (2009) e dos cálculos auxiliares dispostos a seguir, foi possível calcular o volume e área superficial total do tijolo.

a) Volume total do tijolo:

O volume total do tijolo (V) foi calculado a partir de suas dimensões geométricas: largura (R_1), altura (R_2) e comprimento (R_3); e das dimensões características dos furos do tijolo: a_1, a_2, a_3, a_4 , a partir das seguintes equações:

$$V_f = 8 [R_3 \times l \times h] \quad (7)$$

$$V = [(R_1 \times R_2 \times R_3) - V_f] \quad (8)$$

onde,

$$h = \frac{(2 \times R_2 - 2 \times a_1 - 3 \times a_3)}{4} \quad (9)$$

$$l = \frac{(2 \times R_1 - 2 \times a_2 - a_4)}{2} \quad (10)$$

b) Área total do tijolo:

Assim como o volume total, a área total do tijolo foi determinada a partir das áreas superficiais externa (S1) e interna (S2) que foram calculadas utilizando as dimensões geométricas do tijolo e de seus respectivos furos, com auxílio das seguintes equações:

$$S = S_1 + S_2 \quad (11)$$

sendo,

$$S_1 = 2 \times [2 \times (R_3 \times R_2)] + 2 \times [2 \times (R_1 \times R_3)] + 2 \times [2 \times (R_1 \times R_2) - 8 (h \times l)] \quad (12)$$

$$S_2 = 8 \times [2 \times (R_3 \times l) + 2 \times (R_3 \times h)] \quad (13)$$

Logo, dado os cálculos auxiliares e as condições experimentais reportadas por Silva (2009), nas Tabela 1 e 2 encontram-se dispostos os dados referentes às dimensões do tijolo cerâmico e os parâmetros experimentais para o ar de secagem e o tijolo cerâmico durante o processo, respectivamente.

Tabela 1. Dimensões do tijolo cerâmico para cada temperatura de secagem.

| T (°C) | R ₁ (m) | R ₂ (m) | R ₃ (m) | S (m ²) | V (m ³) |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 50 | 0,09336 | 0,197 | 0,200 | 0,3697938784 | 0,00144478784 |
| 60 | 0,09275 | 0,195 | 0,200 | 0,3690206932 | 0,0013672750528 |
| 70 | 0,09316 | 0,197 | 0,203 | 0,368343566 | 0,001621580849 |
| 80 | 0,09276 | 0,197 | 0,201 | 0,364992648 | 0,001410957288 |
| 90 | 0,0931 | 0,197 | 0,201 | 0,3653416502 | 0,0014261613702 |
| 100 | 0,0928 | 0,198 | 0,202 | 0,3525822076 | 0,0017340260952 |

Fonte: J. Silva (2009).

Tabela 2. Parâmetros experimentais do ar de secagem e do tijolo cerâmico para cada teste de secagem.

| Teste | Ar | | Tijolo | | |
|-------|--------|--------|------------------------|------------------------|---------------------|
| | T (°C) | UR (%) | M ₀ (Kg/Kg) | M _e (Kg/Kg) | θ ₀ (°C) |
| 1 | 50 | 20,8 | 0,1397 | 0 | 20,6 |
| 2 | 60 | 13,5 | 0,1479 | 0,00038 | 20,5 |
| 3 | 70 | 7,6 | 0,1541 | 0 | 26,0 |
| 4 | 80 | 4,6 | 0,1525 | 0 | 21,4 |
| 5 | 90 | 3,3 | 0,1592 | 0 | 21,0 |
| 6 | 100 | 1,8 | 0,1690 | 0,00038 | 26,1 |

Fonte: J. Silva (2009).

Como mencionado previamente, o método de estimativa de parâmetros de processo possibilita a obtenção dos parâmetros de secagem com grande precisão. Para a sua correta aplicabilidade, é estatisticamente mais adequado realizar o ajuste de parâmetros a partir de uma distribuição uniforme de pontos ao longo do processo. Para isto, propõe-se um ajuste dos dados experimentais do teor de umidade e temperatura superficial do tijolo à modelos matemáticos empíricos, a partir das Equações 14 e 15. Assim, após algumas tentativas, foram propostos modelos exponenciais para as transferências de massa e calor, como descrito nas Equações 3 e 6, respectivamente.

$$M = (M_0 - M_e) \times \text{Exp}(-k_1 \times t) + M_e \quad (14)$$

$$\theta = \theta_e - (\theta_e - \theta_0) \times \text{Exp}(-k_2 \times t) \quad (15)$$

Neste sentido, dado o modelo, os ajustes foram realizados utilizando o software Statistica®. Para a estimativa do parâmetro k_1 da Equação 14 foi utilizando o método numérico Simplex, enquanto que a estimativa do parâmetro k_2 da Equação 15 foi realizada utilizando o método numérico Quasi-Newton, ambas com critério de convergência de 0,000099.

3. Resultados e Discussão

a) Análise da Transferência de Massa

A Tabela 3 resume os parâmetros obtidos para a Equação 14, através do método de estimação de parâmetros.

Tabela 3. Parâmetros da Equação 14 obtidos após ajuste dos dados experimentais do teor de umidade.

| T (°C) | Parâmetro | R | Proporção da variância (%) |
|--------|-----------|---------|----------------------------|
| | k_1 | | |
| 50 | 0,004406 | 0,99582 | 99,17 |
| 60 | 0,004738 | 0,99759 | 99,52 |
| 70 | 0,006743 | 0,99815 | 99,63 |
| 80 | 0,009332 | 0,99461 | 98,92 |
| 90 | 0,009269 | 0,99656 | 99,31 |
| 100 | 0,009923 | 0,99659 | 99,32 |

Fonte: Dados da Pesquisa.

Sabe-se que o coeficiente de determinação (R) é um dos métodos mais utilizados para avaliar a qualidade do ajuste de um modelo matemático proposto e, quanto mais próximo o coeficiente de determinação for de 1.0, melhor será a capacidade do modelo em expressar os dados experimentais. Dessa forma, ao analisar os coeficientes de determinação encontrados para cada temperatura de secagem, os valores foram superiores à 0.99, indicando que o modelo matemático escolhido ajustou-se perfeitamente aos dados experimentais reportados por J. Silva (2009).

Ainda analisando a Tabela 3, verifica-se que, ao comparar as Equações 3 e 14, o parâmetro k_1 é dado por: $k_1 = \frac{h_m S}{V}$. Assim, com a estimativa desse parâmetro através da metodologia utilizada e com os valores da área e volume total do tijolo obtidos experimentalmente para cada temperatura de secagem, foi possível determinar o coeficiente de transferência de massa

convectivo para cada condição de secagem. Os valores deste parâmetro encontram-se dispostos na Tabela 4.

Tabela 4. Coeficientes de transferência de massa convectivo para cada temperatura de secagem.

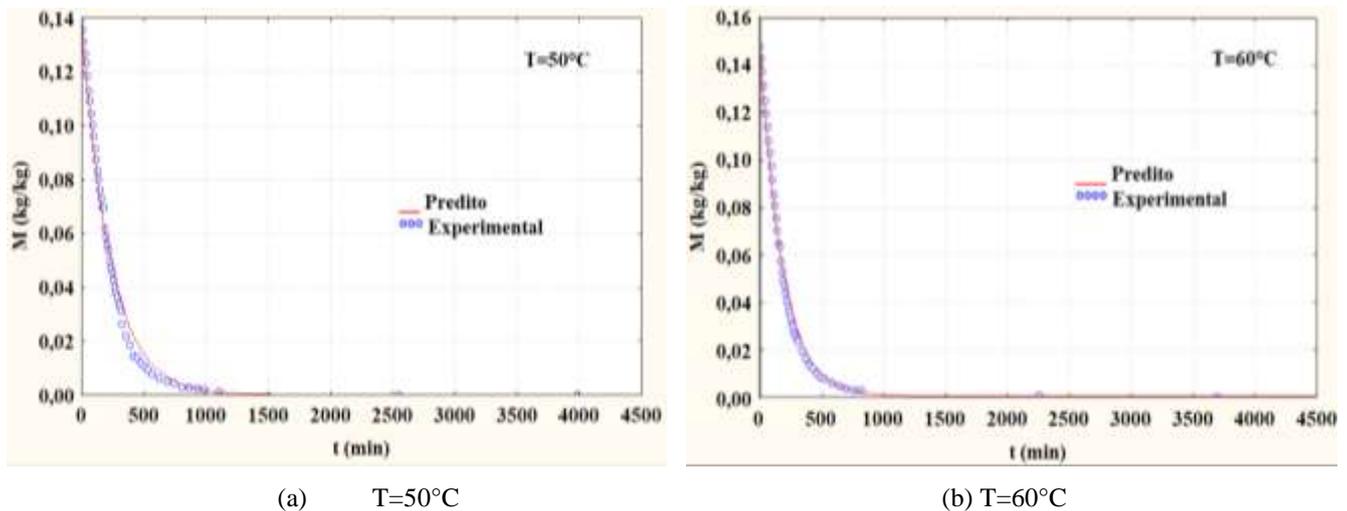
| T (°C) | Coefficiente de transferência de massa, h_m (m/s) |
|--------|---|
| 50 | $2,86905 \times 10^{-7}$ |
| 60 | $2,92583 \times 10^{-7}$ |
| 70 | $4,95192 \times 10^{-7}$ |
| 80 | $6,01247 \times 10^{-7}$ |
| 90 | $6,03047 \times 10^{-7}$ |
| 100 | $8,17466 \times 10^{-7}$ |

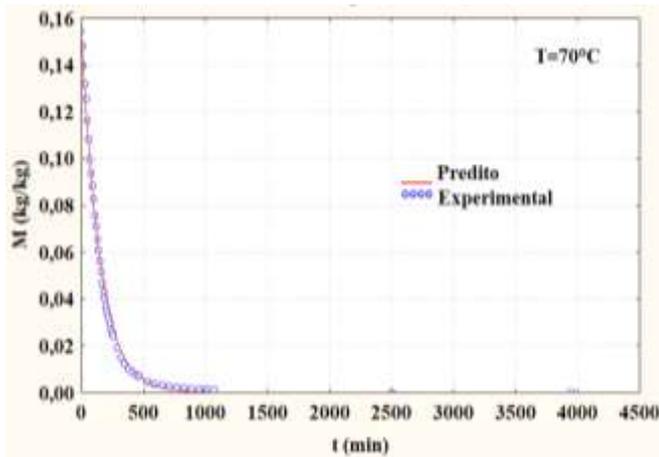
Fonte: Dados da Pesquisa.

Analisando os valores do coeficiente de transferência de massa convectivo em função da temperatura de secagem, nota-se, claramente, que há um aumento no valor deste parâmetro com o aumento da temperatura. Isso se dá, pois, o aumento da temperatura (de 50°C à 100°C) implica no aumento das taxas de secagem e aquecimento do tijolo, fazendo com que as condições de equilíbrio higroscópico e térmico sejam alcançadas mais rapidamente.

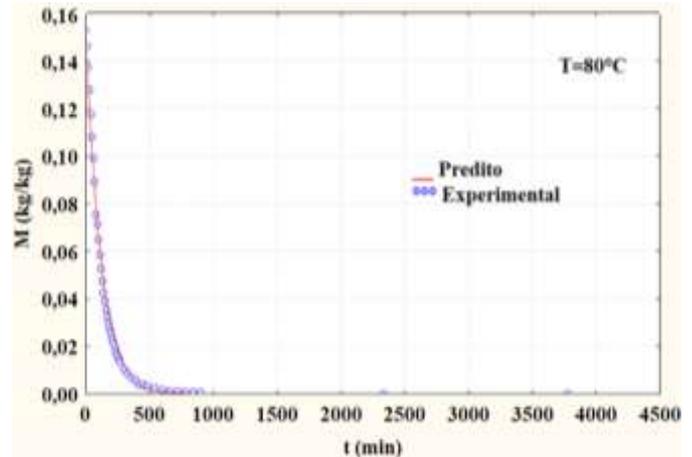
A Figura 2 exibe as curvas de ajuste do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo para processo de secagem realizado a temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, e 100°C.

Figura 2. Variação predita (—) e experimental (°°) do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para diferentes temperaturas.

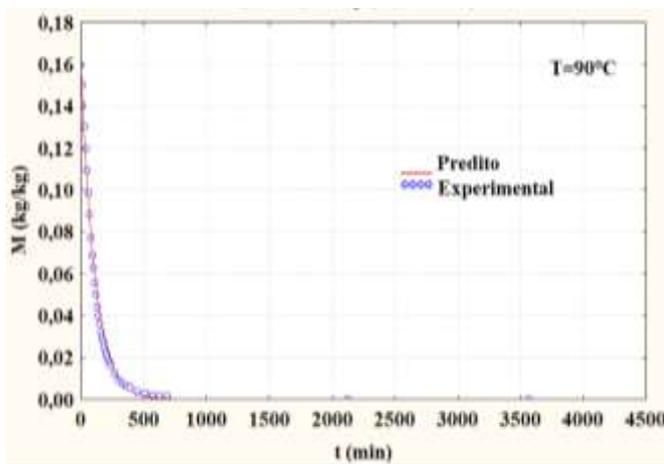




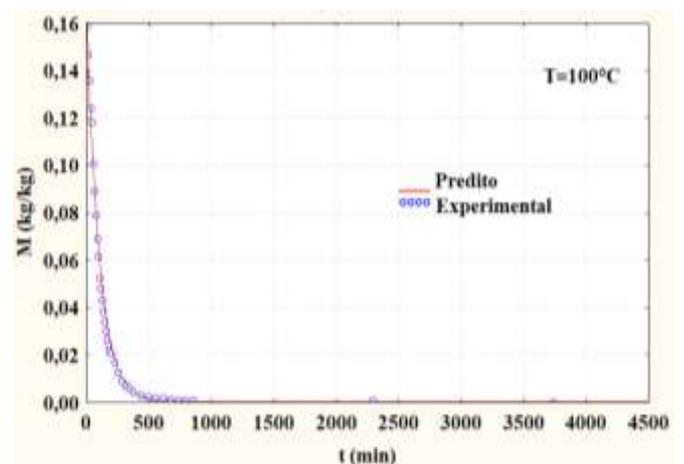
(c) T=70°C



(d) T=80°C



(e) T=90°C



(f) T=100°C

Fonte: Dados da Pesquisa.

Segundo J. Nascimento et al. (2005) e S. Silva et al. (2021), reporta-se na literatura que, nos primeiros minutos da etapa de secagem ocorre uma significativa remoção da umidade existente no sólido. Portanto, ao observar a Figura 2, para todas as temperaturas, nota-se que ocorre uma abrupta redução no teor de umidade logo nos primeiros minutos de processo. Para as temperaturas de 50°C à 70°C, essa redução ocorre nos primeiros 500 minutos (aproximadamente 8,33 horas) de processo, enquanto que, para as temperaturas de 80°C à 100°C, essa redução ocorre nos primeiros 250 minutos (4,17 horas). É notório que, para todas as temperaturas de secagem, nas primeiras horas de processo a redução do teor de umidade ocorre de forma mais intensa. Além disso, também é possível observar que, quanto mais alta é a temperatura do ar de secagem maior é a taxa de secagem, implicando em uma redução significativa no tempo de processo.

Ao analisar os gráficos também é possível observar que há boa concordância entre os valores experimentais e os valores preditos pelo modelo matemático utilizado, confirmando assim, que a modelagem utilizada para estimar os parâmetros é eficaz, corroborando com os valores definidos para os coeficientes de determinação.

b) Análise da Transferência de Calor

De maneira análoga à análise de transferência de massa, a Tabela 5 exibe os valores do parâmetro k_2 da Equação 15 utilizando do método de estimativa de parâmetros.

Tabela 5. Parâmetros da Equação 15 obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura.

| T (°C) | Parâmetro | R | Proporção da variância (%) |
|--------|----------------|---------|----------------------------|
| | k ₂ | | |
| 50 | 0,002413 | 0,75219 | 56,58 |
| 60 | 0,002949 | 0,95030 | 90,31 |
| 70 | 0,004151 | 0,95623 | 91,44 |
| 80 | 0,004617 | 0,95947 | 92,06 |
| 90 | 0,005130 | 0,96485 | 93,09 |
| 100 | 0,006620 | 0,95055 | 90,36 |

Fonte: Dados da Pesquisa.

Como já citado anteriormente nessa seção, o coeficiente de determinação (R) é o que indica se o modelo de ajuste proposto é eficaz em expressar os dados experimentais. Para a transferência de calor, os coeficientes de determinação apresentaram valores superiores à 0.9, com exceção da temperatura de secagem de T=50°C, cujo coeficiente foi de 0.75; este valor abaixo da média pode estar relacionado à algum erro de medição, uma vez que, para realizar as aferições, o tijolo era retirado da estufa, estando sujeito à perda de calor para o ambiente externo. Além disso, os baixos valores do coeficiente de determinação para a transferência de calor (quando comparados aos da análise de transferência de massa) pode correlacionar-se com o fato de que, para este ajuste, houve a desconsideração da transferência de massa simultânea.

É verificado, ao comparar as Equações 6 e 15, que $k_2 = \frac{h_c S}{\rho V C_p}$. Dessa forma, com a estimativa desse parâmetro através da metodologia utilizada e com os respectivos valores da área e volume totais do tijolo para cada temperatura de secagem, obtidos experimentalmente, bem como os valores da densidade e do calor específico à pressão constante, foi possível definir o coeficiente de transferência de calor convectivo para cada temperatura de secagem. Os valores obtidos para este coeficiente estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6. Coeficientes de transferência de calor convectivo para cada temperatura de secagem.

| T (°C) | Coeficiente de transferência de calor, h _c (W/m ² .°C) |
|--------|--|
| 50 | 0,504866 |
| 60 | 0,585091 |
| 70 | 0,979602 |
| 80 | 0,955997 |
| 90 | 1,073430 |
| 100 | 1,741370 |

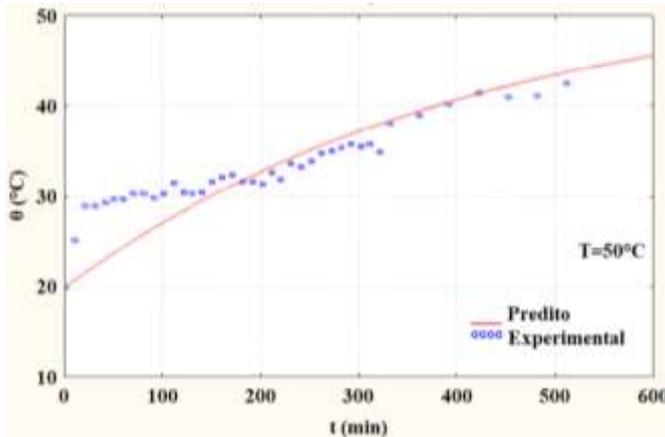
Fonte: Dados da Pesquisa.

Assim como para a transferência de massa, ao analisar os coeficientes de transferência de calor convectivo, é possível observar que há um aumento no valor do coeficiente em função do aumento de temperatura de secagem. Como já citado, isso ocorre em função do aumento das taxas de secagem, uma vez que, em temperaturas mais altas o sólido consegue atingir o seu equilíbrio térmico com maior rapidez. Os baixos valores deste parâmetro são típicos de convecção natural, como esperado,

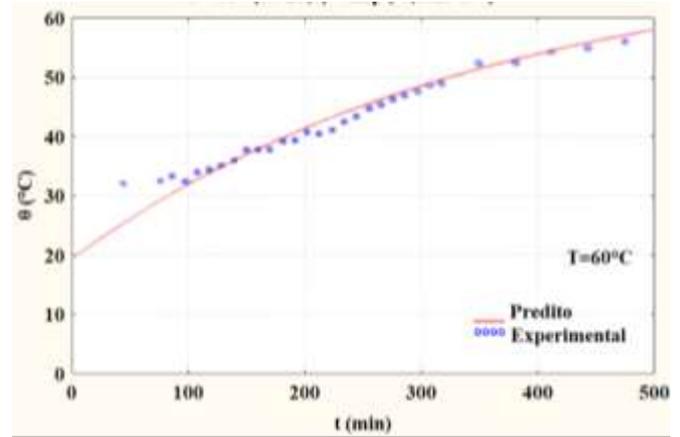
devido a baixa velocidade do ar no interior da estufa.

As curvas de ajuste da temperatura do tijolo cerâmico em função do tempo de processo para as temperaturas de $T=50^{\circ}\text{C}$ à $T=100^{\circ}\text{C}$ encontram-se dispostas na Figura 3.

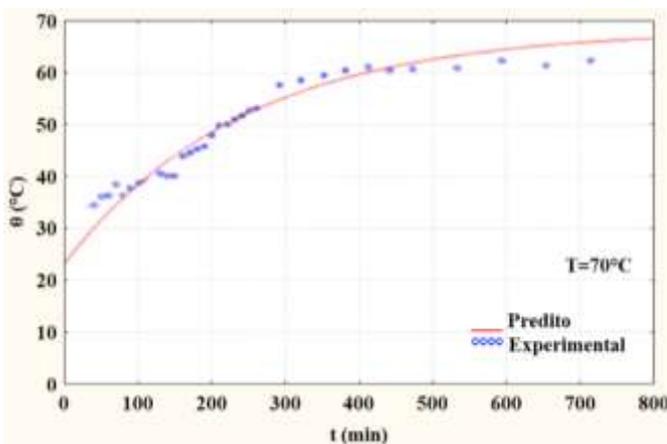
Figura 3. Variação predita (—) e experimental (°°) da temperatura do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para diferentes temperaturas.



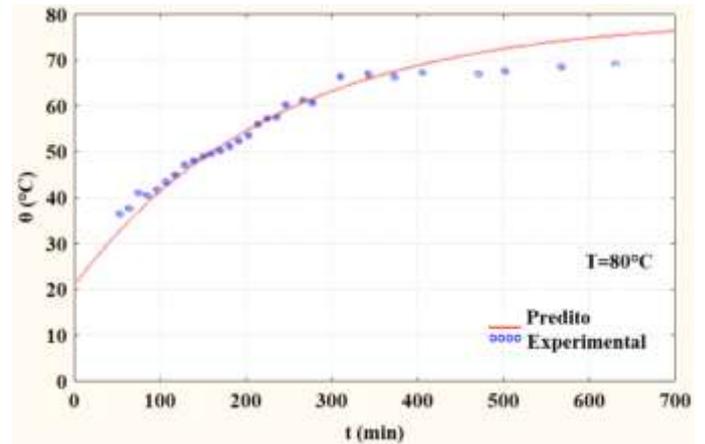
(a) $T=50^{\circ}\text{C}$



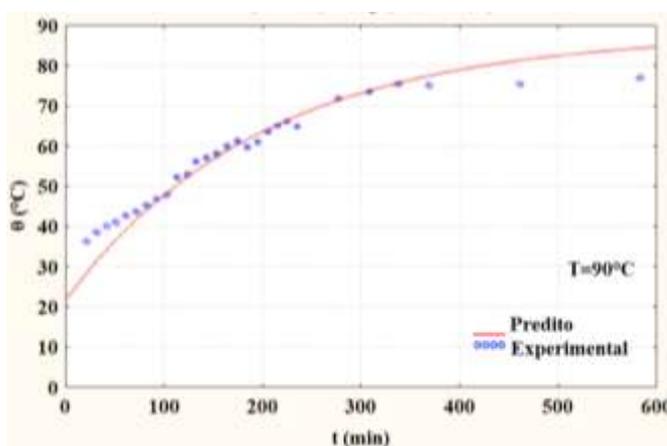
(b) $T=60^{\circ}\text{C}$



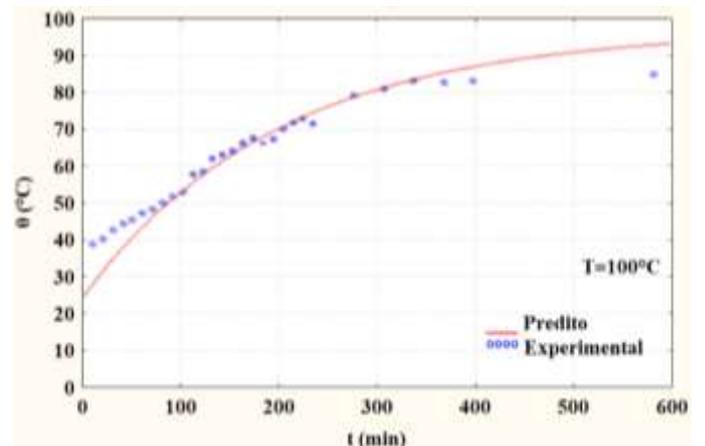
(c) $T=70^{\circ}\text{C}$



(d) $T=80^{\circ}\text{C}$



(e) $T=90^{\circ}\text{C}$



(f) $T=100^{\circ}\text{C}$

Fonte: Dados da Pesquisa.

É possível observar, ao analisar as curvas para a variação de temperatura do tijolo durante a secagem, uma semelhança de comportamento entre esta variável de processo e a variação do teor de umidade do sólido. Para temperaturas de processo mais baixas, como as temperaturas de $T=50^{\circ}\text{C}$ à $T=70^{\circ}\text{C}$, a temperatura do tijolo sofre um aumento mais significativo até os 300 minutos (5 horas) de processo, onde, a partir desse tempo, assume um comportamento lento, quase constante, visto que o sólido atinge o seu equilíbrio térmico. Já para temperaturas de processo mais altas, o sólido leva um menor tempo para atingir esse comportamento térmico em regime permanente, nota-se que o comportamento crescente da temperatura se dá até os 250 minutos (4,17 horas) de processo e, a partir desse tempo, o aumento da temperatura do tijolo ocorre de forma mais lenta, atingindo o seu equilíbrio térmico. Assim, é possível concluir que, as taxas de aquecimento são mais elevadas com temperaturas de processos mais altas. Todavia, vale salientar que, realizar a secagem com altas taxas de aquecimento e uma baixa umidade relativa do ar causa uma maior remoção da umidade do sólido, podendo ocasionar assim, danos ao produto cerâmico, afetando sua qualidade e desempenho.

Levando em consideração a importância de métodos que buscam a otimização do processo de secagem de materiais cerâmicos, tema abordado neste trabalho, os autores sugerem que novas pesquisas quantitativas e qualitativas relacionadas a este tema sejam conduzidas, de modo que ampliem-se os conhecimentos acerca do processo de secagem bem como do seu papel no desempenho, qualidade e custo final de uma peça cerâmica. Para isto, sugere-se que análises e experimentos com outros produtos cerâmicos industriais, com geometrias e dimensões distintas, sejam realizadas, assim como, a aplicação de modelos matemáticos mais completos que, considerem as transferências de calor e massa e as variações dimensionais que estes materiais sofrem durante o processo de secagem. Por fim, com este trabalho, os autores esperam contribuir no entendimento da secagem de tijolos cerâmicos, de modo a fornecer informações adicionais que possibilitem a otimização deste processo e promovam um aumento na eficiência global do setor ceramista.

4. Conclusão

O presente estudo abordou uma investigação teórica e numérica referente ao processo de secagem de tijolos cerâmicos industriais. Foram avaliados, através de modelos matemáticos baseados no método de análise concentrada, o comportamento gravimétrico e térmico destes tijolos durante sua etapa de secagem. Sendo assim, baseando-se nos resultados obtidos, pode-se concluir:

- a) O método de estimativa de parâmetros baseado no modelo de análise concentrada mostrou-se adequado para descrever o processo de secagem de tijolos cerâmicos;
- b) O modelo exponencial proposto para prever o comportamento gravimétrico e térmico do tijolo durante o processo de secagem foi satisfatório, uma vez que os valores para os coeficientes de determinação, encontrados através do ajuste do modelo matemático aos dados experimentais, foram superiores à 0.9 na maioria das amostras;
- c) Em temperaturas mais altas, o processo de secagem de tijolos cerâmicos ocorre com maiores taxas de secagem e aquecimento, implicando em um menor tempo de processo;
- d) Os coeficientes de transferência de massa e calor convectivos, estimados através do modelo matemático desenvolvido, apresentaram ambos, um aumento em função do aumento da temperatura de secagem, como característica de convecção natural.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, ao CNPq, e a FINEP pelo apoio financeiro, e aos pesquisadores referenciados no texto que, com suas pesquisas, contribuíram para o melhoramento do presente trabalho.

Referências

- Akyol, U.; Kahveci, K.; Cihan, A. (2013). Determination of optimum operating conditions and simulation of drying in a textile drying process. *The Journal of The Textile Institute*, 104 (2), 170-177.
- Anfacer. (2018). *Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres*. <<https://www.anfacer.org.br/historia-ceramica>>.
- Araújo, M. V.; Correia, B. R. B.; Brandão, V. A.; Oliveira, I. R.; Santos, R. S.; Neto, G. L. O.; Silva, L. P. L.; Lima, A. G. B. (2020). Convective Drying of Ceramic Bricks by CFD: Transport Phenomena and Process Parameters Analysis. *Energies*, 13 (2073).
- Brito, M. K. T. (2016). *Estudo teórico da transferência de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos com forma paralelepípedica*. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande].
- Bustamante, G. M., & Bressiani, J. C. (2000). A indústria cerâmica brasileira. *Cerâmica Industrial*, 5 (3), 31-36.
- Faustino, D. B. L. (2016). *Secagem de tijolos cerâmicos no formato de paralelepípedo: teorias de secagem*. [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual da Paraíba].
- Junior, M. C.; Azevedo, P. B. M.; Cuchierato, G.; Motta, J. F. M. (2019). Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: Parte I – introdução e a indústria de cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, 24 (1), 20-34.
- Nascimento, J. J. S., Mederos, B. J. T., Belo, F. A., Lima, A. G. B. (2005). Mass transport with shrinkage inside parallelepiped solids. *Información Tecnológica*, 16 (1), 35-41.
- Nascimento, J. J. S., Luna, C. B. B., Costa, R. F., Barbieri, L. F. P., Bezerra, E. O. T. (2019). Evaluation of red clay and ball clay drying using transient threedimensional mathematical modeling: volumetric shrinkage and moisture content. *Materials Research Express*, 6.
- 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).
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Editora UAB/NTE/UFSM, Santa Maria/RS.
- Perez-Monserrat, E. M., Agua, F., Fort, R., Buergo, M. A., Conde, J. F., García-Heras, M. (2016). Effect of manufacturing methods on the decay of ceramic materials: A case study of bricks in modern architecture of Madrid (Spain). *Applied Clay Science*.
- Prado, U. S., & Bressiani, J. C. (2013). Panorama da indústria cerâmica brasileira na última década. *Cerâmica Industrial*, 18, (1), 7-11.
- Sander, A., Skansi, D., & Bolf, N. (2003). Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs. *Ceramics International*, 29 (6), 641-653.
- Santos, J. P. S. (2018). *Secagem de materiais cerâmicos com forma complexa: um estudo teórico via CFX*. [Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande].
- Silva, J. B. (2009). *Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados*. [Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande].
- Silva, L. D., Silva, W. P., Silva, C. M. D. P. S., Farias, V. S. O. (2013). Descrição da secagem de placas cerâmicas por meio de um modelo de difusão. *Cerâmica*, 59, 409-416.
- 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, Universidade Federal de Campina Grande].
- Silva, A. C., Méxas, M. P., & Quelhas, O. L. G. (2017). Restrictive factors in implementation of clean technologies in red ceramic industries. *Journal of Cleaner Production*, 168, 441-451.
- Silva, A. M. V. (2018). *Secagem de blocos cerâmicos industriais: modelagem, simulação e experimentação*. [Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande].
- Silva, S. K. B. M. (2018). *Secagem de tijolos cerâmicos industriais: estimativa de parâmetros de processo via modelo concentrado*. [Trabalho de Conclusão, Universidade Federal de Campina Grande].
- Silva, S. K. B. M., Araújo, C. J., & Lima, A. G. B. (2021). Análise numérica da variação dimensional em blocos cerâmicos estruturais durante o processo de secagem. *Research, Society and Development*, 10 (6).