

**Secagem de materiais cerâmicos argilosos com forma complexa: uma análise teórica  
usando o método da capacitância global**

**Drying of clay ceramic materials with complex shape: a theoretical analysis using the  
lumped capacitance method**

**Secado de materiales cerámicos arcillosos con forma compleja: un análisis teórico  
utilizando el método de capacitancia global**

Recebido: 18/11/2020 | Revisado: 19/11/2020 | Aceito: 20/11/2020 | Publicado: 25/11/2020

**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

**Eduarda Holanda Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7773-6188>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: eholanda96@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

**Ricardo Soares Gomez**

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: ricardosoaresgomez@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

**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

**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**

A necessidade de investimento na melhoria de qualidade, produtividade, redução de custos e economia de energia de processo é uma preocupação crescente do setor ceramista. O processo de secagem consiste na remoção de umidade de um material através do aquecimento, envolvendo alto consumo de energia. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo estudar teoricamente a secagem de sólidos cerâmicos vazados e com forma arbitrária utilizando uma modelagem matemática fenomenológica baseando-se no método da capacitância global. Resultados cinéticos de perda de massa e aquecimento do sólido vazado em diferentes condições operacionais são apresentados e analisados. Observou-se que a perda de umidade ocorre numa menor velocidade que o aquecimento do material, que o formato do sólido e sua relação área/volume afetam fortemente os fenômenos de transporte de calor e massa e que, dependendo da severidade, pode ocasionar danos na estrutura como deformações, trincas, empenamentos e perda do produto.

**Palavras-chave:** Secagem; Aquecimento; Analítico; Análise concentrada; Materiais cerâmicos.

## **Abstract**

The need for investment in improving quality, productivity, and low cost and process energy savings is a growing concern of the ceramist sector. The drying process consists in moisture removal from a material through heating, involving high energy consumption. In this sense, this work aim to study theoretically the drying of hollow ceramic solids with arbitrary shape using a phenomenological mathematical modeling based on the lumped capacitance method. Kinetic results of mass loss and heating of the hollow solid under different operating conditions are presented and analyzed. It was observed that the loss of moisture occurs at a slower rate than the heating rate of the material, and that the shape of the solid and its area /

volume relationships strongly affect the heat and mass transport phenomena and that, depending on the intensity, can cause structural damages as cracks, deformations, warping and loss of the product.

**Keywords:** Drying; Heating; Analytical; Lumped analysis; Ceramic materials.

## Resumen

La necesidad de inversión para mejorar la calidad, la productividad, la reducción de costes y el ahorro de energía en los procesos es una preocupación creciente en el sector de la cerámica. El proceso de secado consiste en eliminar la humedad de un material mediante calentamiento, lo que implica un alto consumo energético. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo estudiar teóricamente el secado de sólidos cerámicos huecos y con forma arbitraria utilizando un modelo matemático fenomenológico basado en el método de capacitancia global. Se presentan y analizan los resultados cinéticos de la pérdida de masa y el calentamiento del sólido vertido en diferentes condiciones de funcionamiento. Se observó que la pérdida de humedad ocurre a menor velocidad que el calentamiento del material, que la forma del sólido y su relación área / volumen inciden fuertemente en los fenómenos de transporte de calor y masa y que, dependiendo de la intensidad, pueden ocasionar daños estructurales. como grietas, deformaciones, alabeos y pérdida de producto.

**Palabras clave:** Secado; Calentamiento; Analítico; Análisis concentrado; Materiales cerámicos.

## 1. Introdução

No Brasil, a indústria de cerâmica representa 1,0 % do Produto Interno Bruto, tendo, desta forma, uma grande importância para a economia do país. Na região nordeste e, principalmente, no estado da Paraíba, verifica-se uma acentuada atividade industrial nessa área. Há, em todo o estado, mais de uma centena de fábricas de produtos de cerâmica vermelha em atividade, distribuídas em pelo menos 30 municípios paraibanos, oferecendo mais de 2000 empregos diretos.

Apesar da grandeza da indústria cerâmica brasileira e de seu grande potencial, ela se apresenta bastante heterogênea dentro do contexto da globalização. Pode-se dizer que os segmentos que melhor se adaptaram às novas condições são os de revestimento, refratários e louça sanitária, e são também os mais organizados. Nos segmentos materiais estruturais (tijolos, telhas, blocos, etc.), há a necessidade de mais estudos para a melhora da qualidade e o

aumento da produção com custo reduzido (Oliveira et al., 2005).

A cerâmica é um material inorgânico, não metálico que, na sua maioria, tem a argila como constituinte. A argila é composta por conjuntos de minerais, principalmente por silicatos de alumínio hidratado, bem conhecidos por caulim ou caulinita. A cerâmica possui várias fases possibilitando a combinação de átomos metálicos e não-metálicos, formando diferentes arranjos estruturais, que definem suas propriedades.

O produto cerâmico, durante o seu processo de fabricação, passa pelas etapas de tratamento da matéria prima, homogeneização, conformação, secagem e queima.

A secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria química onde sua função é remover água do material por meio de um ar de secagem, diferente da centrifugação ou prensagem que usam meios mecânicos. O ar de secagem transporta calor para o sólido fazendo com que a água do seu interior passe do estado líquido para o vapor ficando acumulado nas proximidades da superfície da peça, sendo também responsável pela retirada da água da superfície do material. A secagem de materiais porosos é um processo complexo que consiste em vários fenômenos de transferência de umidade e calor, incluído variações dimensionais. Como um resultado desses processos, a temperatura do material aumenta e sua umidade diminui (Musielak & Śliwa, 2012).

Em se tratando de produtos de cerâmica vermelha, a etapa de secagem tem uma importância relevante no processo de fabricação destes materiais, uma vez que, nesse processo, tem-se a eliminação da água (que foi adicionada a argila, para conferir-lhe plasticidade e facilitar a moldagem) e o aquecimento das peças. O efeito físico deste processo é a retração das peças e um elevado consumo de energia (Callister Jr. & Rethwisch 2008; Almeida et al., 2013).

Atualmente existem diversos problemas que ocorrem durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos a serem resolvidos. Ao realizar a secagem de forma incorreta, a retirada de água da peça fica sem controle, podendo ocasionar danos estruturais como deformações, trincas, empenamentos e, conseqüentemente, uma elevada perda de produtos (Su, 1997; Augier et al., 2002). Então, controlar o processo de secagem e conhecer os mecanismos da transferência de umidade e calor do material torna-se de fundamental importância para a indústria e academia.

A duração da secagem convectiva (que usa ar aquecido escoando sobre a peça) é função das condições do ar de processo (temperatura, umidade relativa e da ventilação do local), podendo chegar a períodos de até seis semanas. A secagem artificial é realizada em câmaras de secagem ou estufas, aproveitando, via de regra, o calor residual dos fornos,

quando de seu resfriamento. O período da secagem artificial depende das características da matéria-prima, do formato das peças e do tipo do secador. Assim, realizar experimentos de secagem torna-se bastante demorado e oneroso, o que ratifica o uso de simulação para prever tal processo. Com a simulação, podem-se obter condições ótimas de processo, reduzindo consideravelmente as perdas do produto e o consumo de energia, com rapidez e baixo custo (Silva et al., 2012; Silva, 2016).

A descrição detalhada do processo é importante para fornecer informações necessárias para se produzir peças de ótima qualidade e com um mínimo desperdício.

Para conhecer mais o processo de secagem, torna-se necessário verificar a influência das alterações de suas condições nos parâmetros essenciais (taxa de secagem, duração do processo, propriedades de transporte). O movimento da umidade na peça é governado pelas propriedades, forma e tamanho do produto, e o tipo de ligação de umidade no material (Sander et al., 2002). Sabe-se que altas temperaturas e longos tempos de secagem podem significativamente diminuir a qualidade dos materiais secos (mudança de coloração, mudanças permanentes na forma, dano da estrutura interna, endurecimento superficial, mudanças químicas, etc.) (Silva et al., 2013). Neste sentido, este trabalho tem como objetivo estudar teoricamente a secagem de sólidos cerâmicos vazados e com forma arbitrária utilizando uma modelagem matemática fenomenológica baseando-se no método da capacitância global.

## **2. Metodologia**

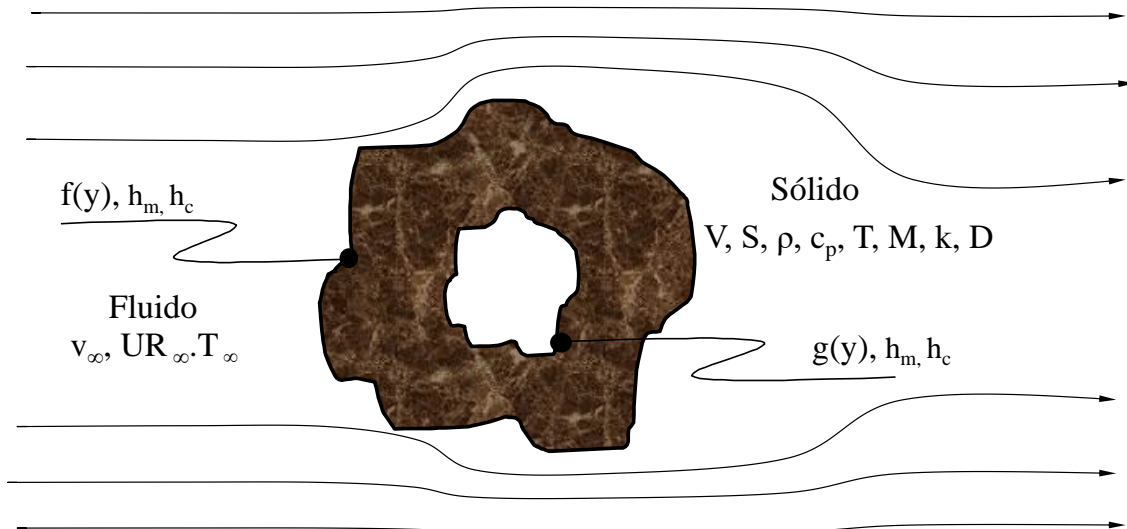
### **Modelo físico-matemático**

Assumindo um processo transiente e desprezando os gradientes de temperatura e de umidade ao longo de um sólido de forma arbitrária, pode-se utilizar o método da capacitância global (análise concentrada) para obter a temperatura e a umidade do produto em função do tempo. Existe um fluxo de calor e/ou umidade tanto entrando como saindo do sólido por unidade de área da sua superfície, além de geração interna de massa e/ou energia por unidade de volume distribuída uniformemente. Como consequência das considerações feitas este fluxo e geração se difundirão instantaneamente através do sólido, o que provoca uma uniformidade no teor de umidade e temperatura dentro do material. Esta é a hipótese do método da capacitância global. Trata-se de uma pesquisa puramente teórica de caráter predominantemente quantitativo, que se baseia em trabalhos reportados na literatura (Silva et

al., 2016; Lima et al., 2018; Pereira et al., 2018).

O sólido tratado nesta pesquisa é vazado conforme ilustrado na Figura 1. As superfícies, externa e interna, do sólido são formadas pelas funções  $f(y)$  e  $g(y)$ , respectivamente.

**Figura 1.** Esquema da secagem de material baseado numa análise concentrada.



Fonte: Autores (2020).

Desde que os gradientes de umidade e temperatura no interior do material não são considerados, o problema é descrito, não pela equação de difusão, mas sim pelos balanços globais de massa e energia (Silva et al., 2016; Lima et al., 2018).

Desta forma, aplicando um balanço de massa no sólido ilustrado na Figura 1, tem-se que:

$$V \frac{d\bar{M}}{dt} = -h_m S (\bar{M} - \bar{M}_e) + \dot{M} V \quad (1)$$

onde  $\bar{M}$  é o teor de umidade;  $\bar{M}_e$  é o teor de umidade de equilíbrio;  $\dot{M}$  é a geração de massa por unidade de volume,  $h_m$  é o coeficiente de transferência de massa convectivo;  $V$  é o volume do sólido, e  $t$  é o tempo.

Considerando  $\bar{M}(t=0) = \bar{M}_0$  como condição inicial, tem-se a solução da Equação (1) como segue:

$$\frac{(\bar{M}-\bar{M}_e)-\frac{MV}{h_m S}}{(\bar{M}_0-\bar{M}_e)-\frac{MV}{h_m S}} = \text{Exp} \left[ \left( \frac{-h_m S}{V} \right) t \right] \quad (2)$$

Na análise da transferência de calor, faz-se a mesma consideração da transferência de massa, e assume-se que, na superfície do sólido, ocorre convecção térmica, evaporação e aquecimento do vapor produzido, simultaneamente. Assim, do balanço de energia no sólido, pode-se escrever:

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = \left[ h_c (\bar{T}_\infty - \bar{T}) + \frac{\rho_s}{S} V \frac{d\bar{M}}{dt} (h_{fg} + c_v (\bar{T}_\infty - \bar{T})) \right] S + \dot{q} V \quad (3)$$

onde  $\rho$  é a densidade do sólido homogêneo;  $\dot{q}$  é a geração de calor por unidade de volume;  $c_p$  é o calor específico do sólido;  $c_v$  é o calor específico do vapor de água;  $h_{fg}$  é o calor latente de vaporização da água;  $\bar{T}_\infty$  é a temperatura do meio externo,  $\bar{T}$  é a temperatura instantânea do sólido;  $\rho_s$  é a densidade do sólido seco, e  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo.

Como a Equação (3) é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem, não-linear e não homogênea e, desconsiderando o termo da energia necessária para aquecer o vapor d'água desde a temperatura na superfície do sólido até a temperatura do fluido, organizando a Equação (1), substituindo na Equação (3) e resolvendo-a, obtém-se:

$$\bar{T}' + \frac{h_c S}{c_p \rho V} \bar{T} = \left( -\rho_s h_m (\bar{M}_0 - \bar{M}_e) + \frac{\rho_s MV}{S} \right) e^{-\frac{h_m S t}{V}} \frac{h_{fg} S}{c_p \rho V} + \frac{h_c S}{c_p \rho V} \bar{T}_\infty + \frac{\dot{q}}{\rho c_p} \quad (4)$$

Sabendo que em  $\bar{T}(t = 0) = \bar{T}_0$ , separando as variáveis da Equação (4) e integrando-a desde a condição inicial, sua solução analítica, com algumas simplificações, será:

$$\frac{(\bar{T}-\bar{T}_\infty)-\left\{\left(-\rho_s h_m (\bar{M}_0-\bar{M}_e)+\frac{\rho_s MV}{S}\right)\left(\frac{h_c S}{c_p \rho V}-\frac{h_m S}{V}\right)\frac{h_{fg} S}{c_p \rho V}+\frac{\dot{q} V}{h_c S}\right\}}{(\bar{T}_0-\bar{T}_\infty)-\left\{\left(-\rho_s h_m (\bar{M}_0-\bar{M}_e)+\frac{\rho_s MV}{S}\right)e^{-\frac{h_m S t}{V}}\left(\frac{h_c S}{c_p \rho V}-\frac{h_m S}{V}\right)\frac{h_{fg} S}{c_p \rho V}+\frac{\dot{q} V}{h_c S}\right\}} = e^{-\frac{h_c S t}{c_p \rho V}} \quad (5)$$

Como aplicação do modelo matemático e da metodologia, foram definidas as seguintes funções  $f(y)$  e  $g(y)$  para gerar o sólido vazado:

$$f(x) = (x - m)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$g(x) = (x - m)^n \quad (7)$$

$$f(y) = y^n + m \quad (8)$$

$$g(y) = y^{\frac{1}{n}} + m \quad (9)$$

onde  $m$  e  $n$  são parâmetros constantes, e  $f(y) > g(y)$ .

Para encontrar o volume dos corpos cerâmicos estudados nessa pesquisa utilizou-se o método dos anéis circulares em sólidos de revolução. Já a área superficial foi dada pela rotação das funções  $f(y)$  e  $g(y)$  em torno do eixo  $y$ . Estes parâmetros geométricos foram determinados como segue:

$$S = \int_{y_1}^{y_2} 2\pi f(y) \sqrt{1 + [f'(y)]^2} dy + \int_{y_1}^{y_2} 2\pi g(y) \sqrt{1 + [g'(y)]^2} dy \quad (10)$$

$$V = \int_{y_1}^{y_2} \pi \{ [f(y)]^2 - [g(y)]^2 \} dy \quad (11)$$

A Tabela 1 resume os parâmetros termofísicos do ar, águas e do material cerâmico e na Tabela 2 estão citados os parâmetros estabelecidos em cada simulação. Para obtenção dos resultados foi desenvolvido em código computacional no software Mathematica<sup>®</sup>, e os resultados graficados usando o software Grapher<sup>®</sup>.

**Tabela 1.** Parâmetros termofísicos usados nas simulações.

$c_p$ (J/kgK)	$h_{fg}$ (J/kg)	$T_\infty$ (°C)	$T_o$ (°C)	$M_e$ (kg/kg)	$\rho_u$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
1600	$2333 \times 10^3$	70	25	0,01	640	550

Fonte: Autores (2020).



**Tabela 2.** Parâmetros termofísicos usados nas simulações.

Caso	m	n	M <sub>o</sub> (kg/kg)	$\dot{M}$ (kg.m <sup>3</sup> /kg.s)	h <sub>m</sub> (m/s)	T <sub>o</sub> (°C)	$\dot{q}$ (W/m <sup>3</sup> )	h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)
1	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
2	0,5	1,5	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
3	0,5	2,5	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
4	0,5	3,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
5	0,5	3,5	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
6	0,5	2,0	0,25	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
7	0,5	2,0	0,30	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
8	0,5	2,0	0,35	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
9	0,5	2,0	0,40	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
10	0,5	2,0	0,20	1×10 <sup>-7</sup>	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
11	0,5	2,0	0,20	5×10 <sup>-7</sup>	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
12	0,5	2,0	0,20	10×10 <sup>-7</sup>	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
13	0,5	2,0	0,20	0	3,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
14	0,5	2,0	0,20	0	5,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
15	0,5	2,0	0,20	0	7,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
16	0,5	2,0	0,20	0	9,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	1,5
17	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	20	0	1,5
18	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	30	0	1,5
19	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	35	0	1,5
20	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	5×10 <sup>3</sup>	1,5
21	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	10×10 <sup>3</sup>	1,5
22	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	15×10 <sup>3</sup>	1,5
23	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	2,0
24	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	2,5
25	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	3,0
26	0,5	2,0	0,20	0	1,8×10 <sup>-9</sup>	25	0	3,5

Fonte: Autores (2020).

### 3. Resultados e Discussão

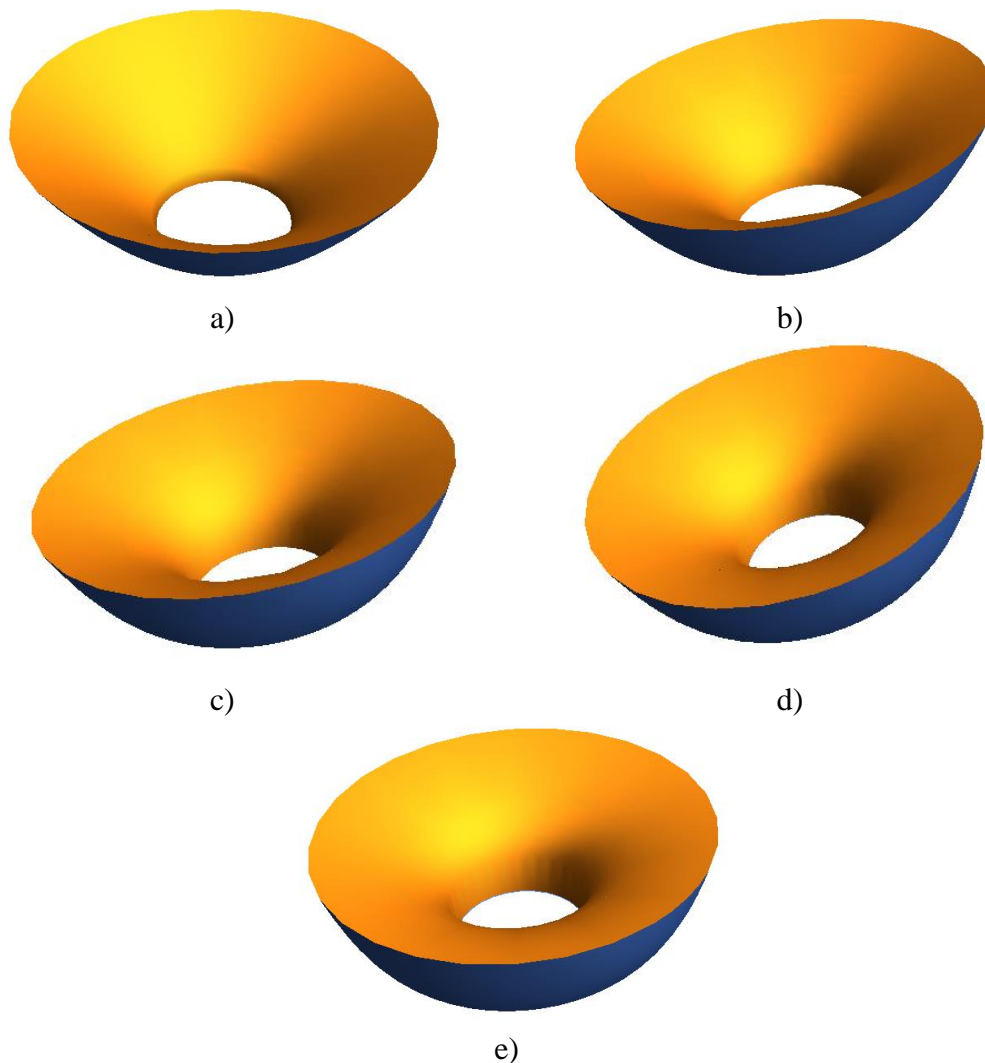
Para uma análise da forma do corpo, na Tabela 3 estão listados os valores de área, volume e relação área/volume de acordo com os parâmetros m e n, que definem a forma geométrica do corpo. As formas gráficas da peça cerâmica de acordo com os valores dos parâmetros m e n estão ilustradas na Figura 2. De uma análise da Tabela 2, pode-se notar que, quanto maior o valor do parâmetro n, menor é a relação área/volume. Da Figura 2, verifica-se que, um aumento no parâmetro n implica em um sólido com forma mais espessa.

**Tabela 3.** Valores de área, volume e relação área/volume obtidos para os valores de m e n usados nas simulações.

m	N	Área (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Área/Volume (cm <sup>-1</sup> )
0,5	1,5	18,0215	1,1893	15,1530
	2,0	18,4326	1,9897	9,2640
	2,5	18,8385	2,5681	7,3356
	3,0	19,2081	3,0070	6,3878
	3,5	19,5381	3,3518	5,8291

Fonte: Autores (2020).

**Figura 2.** Sólidos de revolução usados nas simulações. a) n = 1,5, b) n = 2,0, c) n = 2,5, d) n = 3,0 e e) n = 3,5.

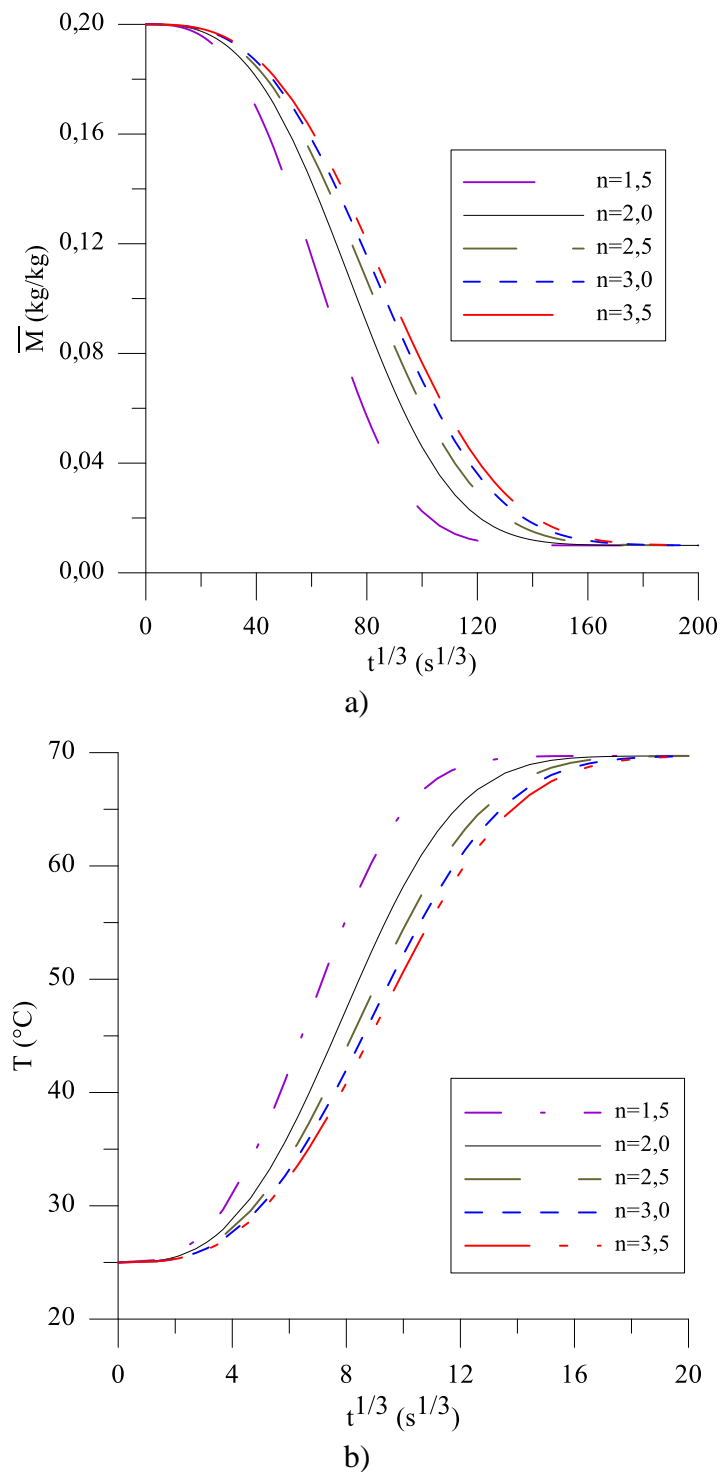


Fonte: Autores (2020).

Na Figura 3 ilustra-se o efeito da relação área/volume (forma do corpo) no teor de umidade e temperatura do material cerâmico ao longo do processo. Após análise destas curvas

verifica-se que, quanto menor a relação área/volume, os corpos secam e se aquecem mais lentamente. Isto é, as velocidades de secagem e aquecimento diminuem, o que favorece a obtenção de sólidos com melhor qualidade pós-secagem.

**Figura 3.** Efeito da relação área/volume nas cinéticas de a) secagem e b) aquecimento do sólido cerâmico (Casos 1 a 5).



Fonte: Autores (2020).

A Figura 4 ilustra o efeito do teor de umidade inicial, nas cinéticas de secagem e aquecimento do corpo cerâmico. Da análise destas figuras nota-se que as curvas possuem inclinações diferentes. Avaliando-se a cinética de secagem verifica-se que, quanto maior o teor de umidade inicial, o sólido seca mais rápido. Contudo, as curvas atingem a umidade final no mesmo tempo. Não há efeito considerável deste parâmetro na temperatura do produto.

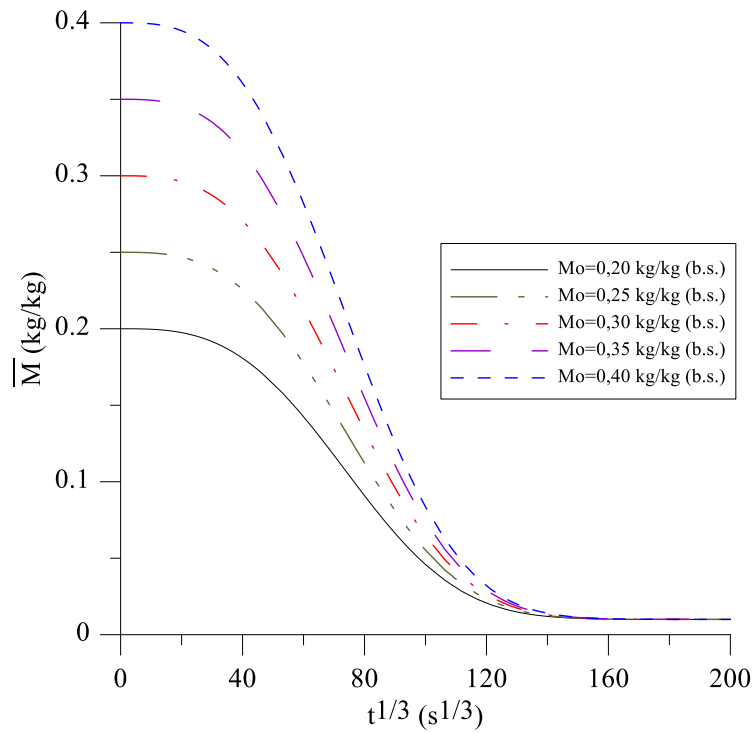
Na Figura 5 analisou-se o efeito da geração de umidade nas cinéticas de aquecimento e secagem do sólido cerâmico. De uma análise destas figuras verifica-se que, a partir de uma quantidade de massa gerada, ao invés da umidade diminuir, ela aumenta consideravelmente com o tempo, implicando que, nestas condições mais severas, a geração de massa supera a perda de massa por convecção na superfície do sólido. Na cinética de aquecimento vê-se que a maior quantidade de massa gerada ocasiona um pequeno aumento na temperatura do sólido, para tempos longos de processo, evidenciando que os fenômenos de calor e de massa ocorrem simultaneamente no processo de secagem.

Na Figura 6 mostra-se o efeito do coeficiente de transferência de massa convectivo nas cinéticas de secagem e aquecimento do sólido cerâmico. Analisando essas figuras verifica-se que, aumentando o coeficiente de transferência de massa convectivo, o corpo seca mais rápido e atinge uma temperatura um pouco menor, nos tempos finais de processo, fixada a forma de corpo.

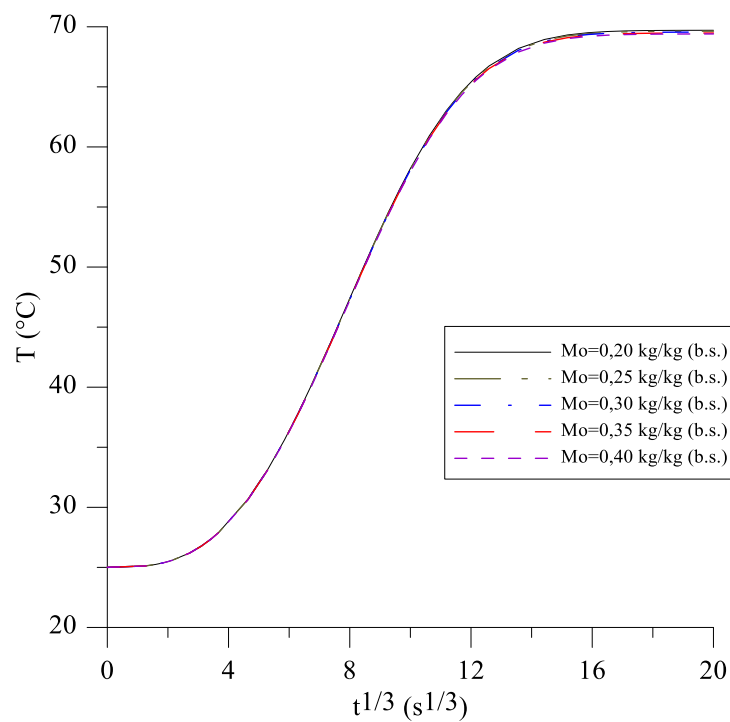
Na Figura 7 pode-se perceber o efeito da temperatura inicial nas cinéticas de secagem e aquecimento do sólido cerâmico. Analisando estas figuras pode-se perceber que, com o aumento da temperatura inicial, o corpo atinge a temperatura a sua temperatura de equilíbrio mais rápido. Na secagem, este parâmetro físico não influencia o processo de remoção de umidade do sólido cerâmico.

Na Figura 8 ilustra-se o efeito da geração de calor nas cinéticas de secagem e aquecimento do sólido cerâmico. De uma análise destas figuras, é possível verificar que, um aumento deste parâmetro faz com que o corpo atinja a sua temperatura de equilíbrio térmico mais rapidamente, contudo, não se verificou qualquer efeito significativo na cinética de secagem. Isto quer dizer que o sólido atinge sua condição de equilíbrio higroscópico no mesmo instante de processo. Verifica-se, ainda, que para a condição de geração de calor nula, o sólido se aquece muito lentamente, quando comparado com os demais casos. Enquanto a temperatura do sólido se encontra levemente superior à sua condição inicial, nos demais casos o sólido já atingiu sua condição de equilíbrio, evidenciando a grande importância deste parâmetro no processo de aquecimento.

**Figura 4.** Efeito do teor de umidade inicial nas cinéticas de a) secagem e b) aquecimento do sólido cerâmico (Casos 1, 6-9).



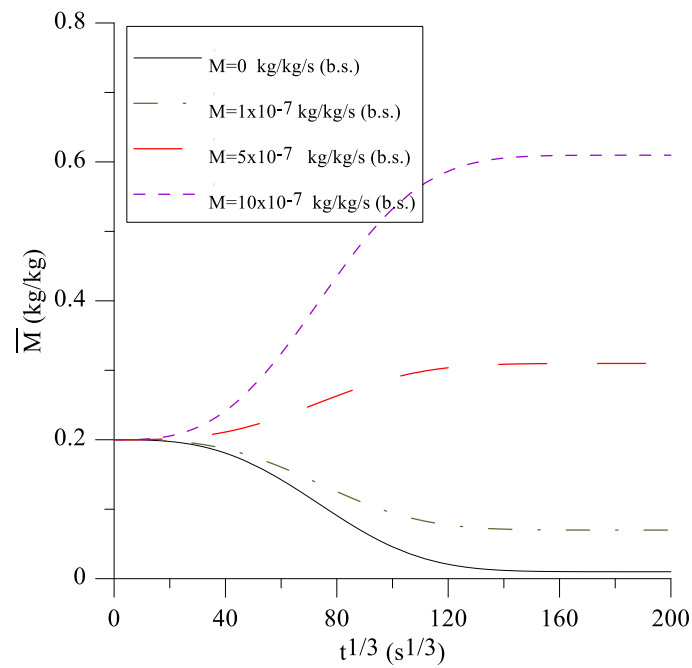
a)



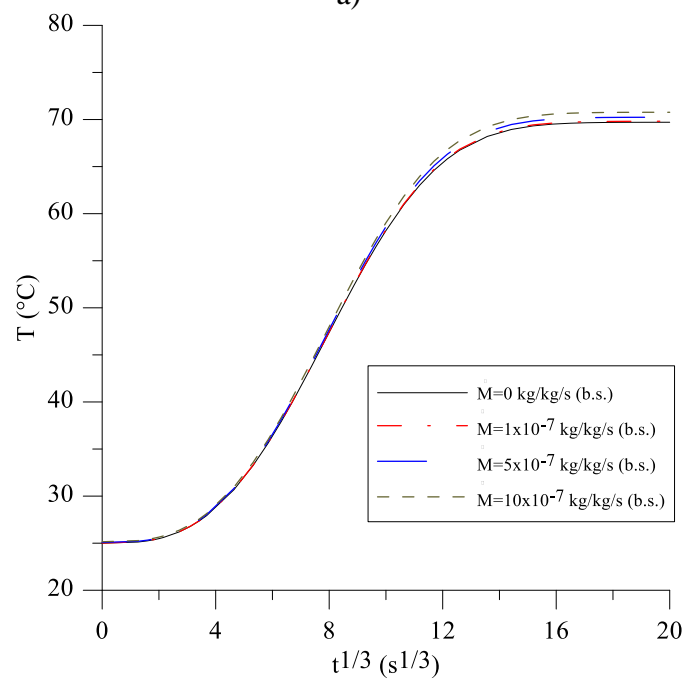
b)

Fonte: Autores (2020).

**Figura 5.** Efeito da geração de massa nas cinéticas de a) secagem e b) aquecimento do sólido (Casos 1,10-12).



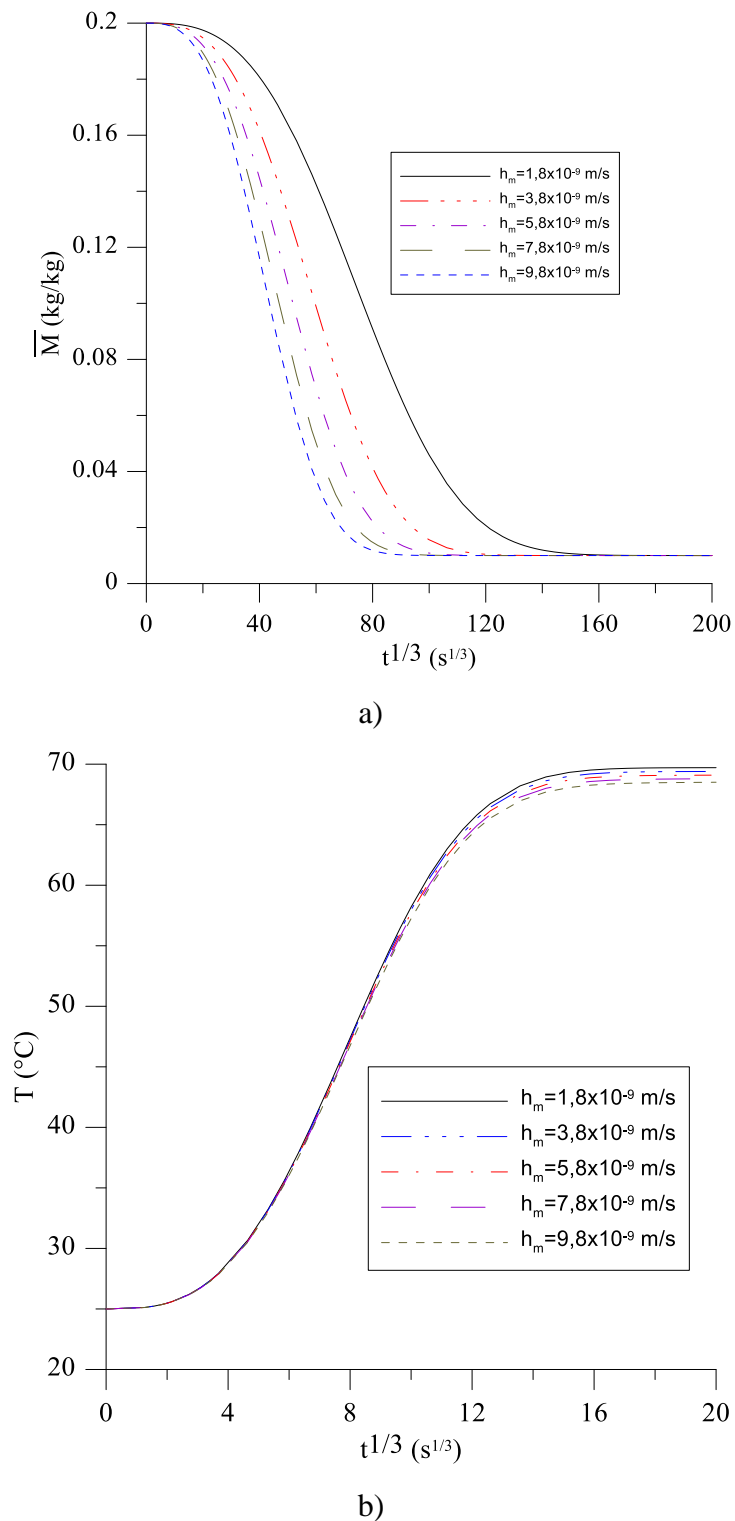
a)



b)

Fonte: Autores (2020).

**Figura 6.** Efeito do coeficiente de transferência de massa convectivo nas cinéticas de a) secagem e b) aquecimento do sólido (Casos 1, 13-16).

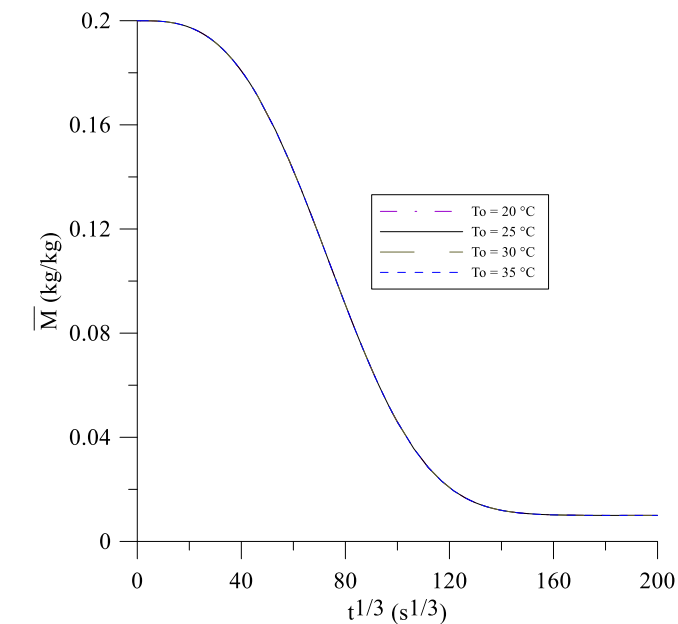


Fonte: Autores (2020).

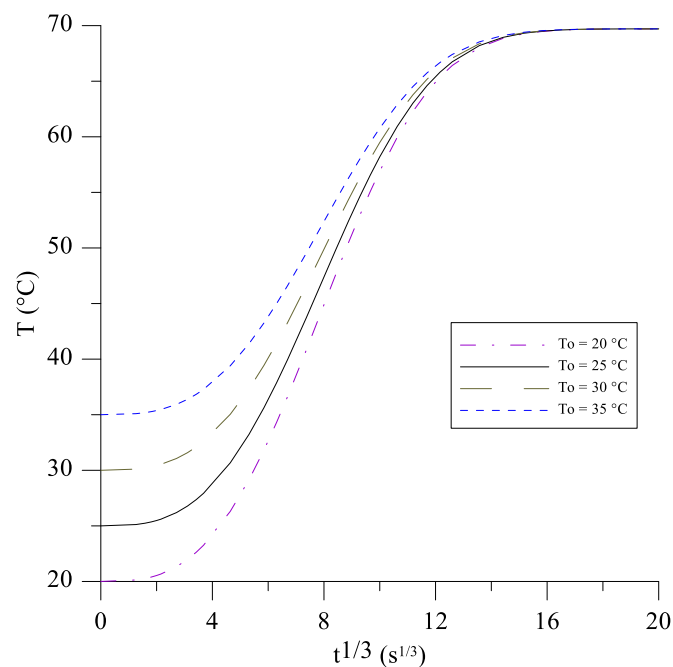
Na Figura 9 está ilustrado o efeito do coeficiente de transferência de calor convectivo nas cinéticas de secagem e aquecimento do sólido cerâmico. De uma análise desta figura

pode-se observar que este parâmetro não influencia na perda de umidade do sólido cerâmico, contudo, quanto maior o valor deste coeficiente, mais rápido o corpo atinge a temperatura de equilíbrio térmico.

**Figura 7.** Efeito da temperatura inicial nas cinéticas de a) secagem e b) aquecimento do sólido cerâmico (Casos 1, 17-19).



a)

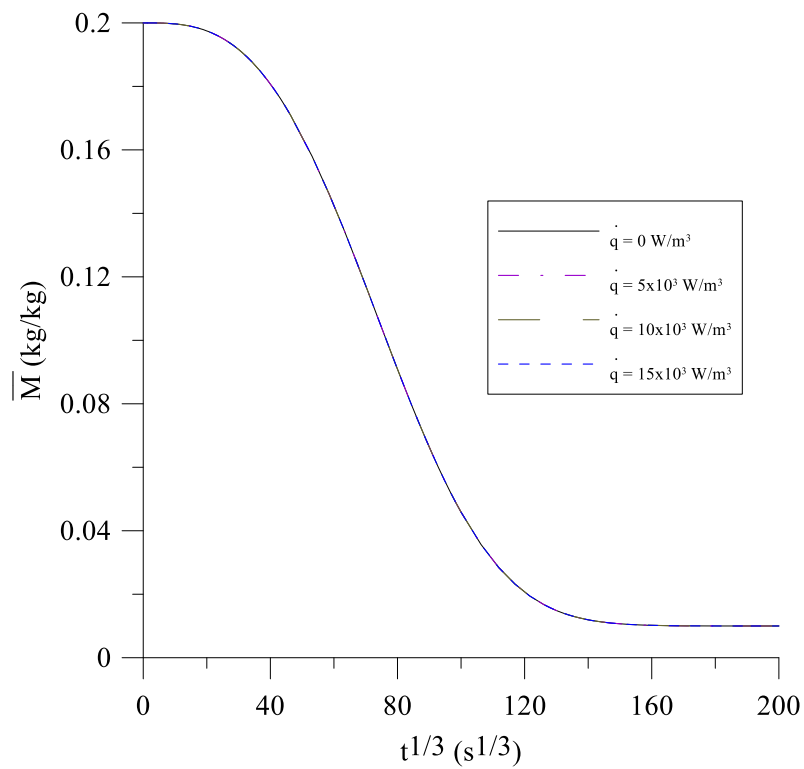


b)

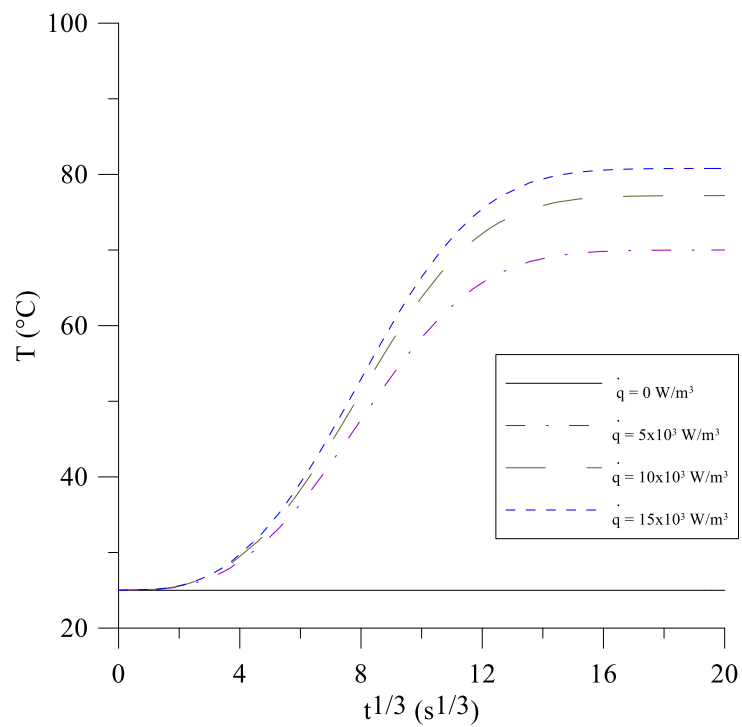
Fonte: Autores (2020).



**Figura 8.** Efeito da geração de calor nas cinéticas de a) secagem e b) aquecimento do sólido cerâmico (Casos 1, 20-22).



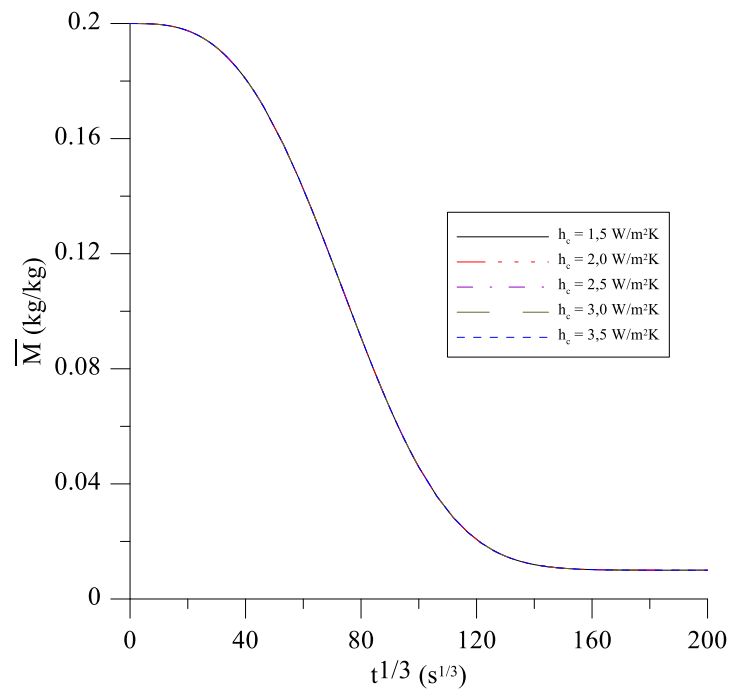
a)



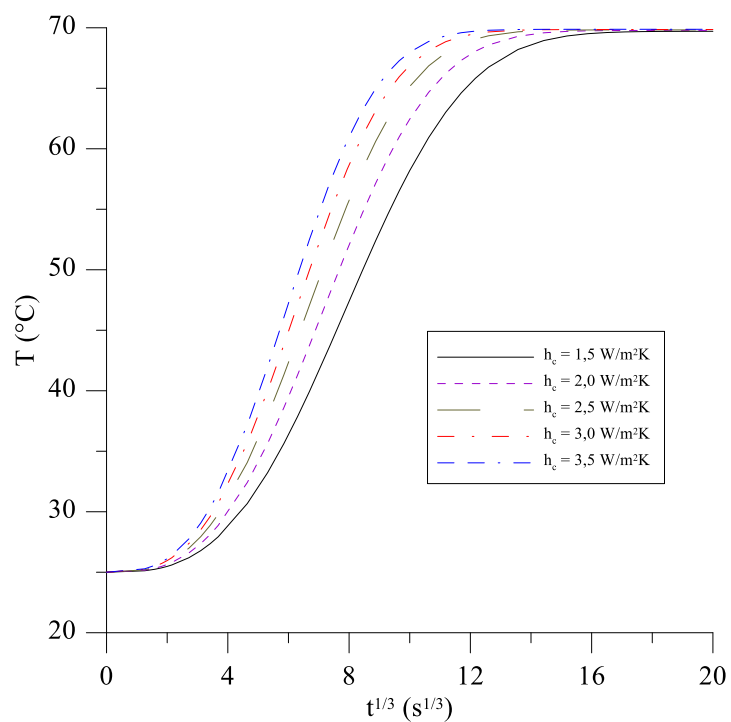
b)

Fonte: Autores (2020).

**Figura 9.** Efeito do coeficiente de transferência de calor convectivo de a) secagem e b) aquecimento do sólido (Casos 1, 23-26).



a)



b)

Fonte: Autores (2020).

De forma geral, quanto maior a temperatura, menor a umidade relativa e maior a velocidade do ar de secagem, maiores serão as taxas de remoção de umidade e de

aquecimento do sólido, contudo, esta condição extremamente severa proporciona uma secagem sem controle, o que pode provocar vários defeitos na peça cerâmica, tais como: trincas, deformações, empenamentos, variações dimensionais severas, que reduzem significativamente a qualidade do produto pós-secagem.

#### **4. Considerações Finais**

Nesta pesquisa o problema de transferência de calor e massa em sólidos cerâmicos vazados, com particular referência a secagem, foi estudado. Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) Quanto maior a relação área/volume mais rápido é a secagem e aquecimento do sólido.
- b) Um aumento na geração de massa no interior do material, proporciona uma redução na taxa de secagem que, dependendo do valor deste parâmetro, um processo de umidificação é verificado.
- c) Quanto maior o coeficiente de transferência de massa convectiva, maior a velocidade de secagem.
- d) Aumentando-se a temperatura inicial do corpo cerâmico, mais rápido ele atinge sua temperatura de equilíbrio térmico, contudo a velocidade de secagem não é alterada.
- e) A geração de calor faz com que os corpos atinjam temperaturas de equilíbrio mais altas em menores tempos de processo, mas a velocidade de secagem não foi afetada.
- f) Com o aumento do coeficiente de transferência de calor convectivo, o corpo atinge a temperatura final mais rápido, mas o tempo de secagem permaneceu inalterado.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao PIBITI/CNPq-UFMG, ao CNPq, a CAPES e a FINEP pelo suporte financeiro.

#### **Referências**

Almeida, G. S. (2009). Simulação e Experimentação da Secagem de Cerâmica Vermelha em Sistemas Térmicos Industriais. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade

Federal de Campina Grande, Campina Grande. Recuperado de <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/11369>

da Silva Almeida, G., da Silva, J. B., e Silva, C. J., Swarnakar, R., de Araújo Neves, G., & de 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(1-2), 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.042>

Augier, F., Coumans, W. J., Hugget, A., & Kaasschieter, E. F. (2002). On the risk of cracking in clay drying. *Chemical Engineering Journal*, 86(1-2), 133-138. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(01\)00279-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00279-0)

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2008). *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Cadé, M. A., Nascimento, J. J. S., & Lima, A. G. B. (2005). Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos. *Revista Matéria*, 10(3), 443–453.

Farias, V. O., Pereira Silva, W., Silva e Silva, C. M. D. P., & de Lima, A. G. B. (2012). Three-dimensional diffusion in arbitrary domain using generalized coordinates for the boundary condition of the first kind: application in drying. *Defect and Diffusion Forum*, 326-328, 120-125. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.120>

Lima, L. D. A., Silva, J. B., & Lima, A. G. (2003). Transferência de calor e massa durante a secagem de sólidos com forma arbitrária: uma abordagem concentrada. *Engenharia agrícola*, 23(1), 150-162.

Lima, E. S., Lima, W. M. P. B., Lima, A. G. B., 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. In In: Delgado J., Barbosa de Lima A. (Eds.) *Transport Phenomena in Multiphase Systems. Advanced Structured Materials* (vol. 93, pp. 181-217). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91062-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91062-8_6)

Musielak, G., & Śliwa, T. (2012). Fracturing of clay during drying: Modelling and numerical simulation. *Transport in Porous Media*, 95(2), 465-481. <https://doi.org/10.1007/s11242-012-0055-4>

Nascimento, J. J. S., de Lima, A. G. B., Teruel, B. J., & Belo, F. A. (2006). Heat and Mass Transfer with Shrinkage During the Drying of Ceramic Bricks. *Información Tecnológica*, 17(6), 125.

Nicolau, V. P., Lehmkuhl, W. A., Kawaguti, W. M., Dadam, A. P., Hartke, R. F., Jahn, T. G. (2004). *Análise Experimental de um Secador contínuo Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha*. In: III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, pp. 1-10, Belém, Brasil.

Oliveira, A. D., Montedo, O. R. K., Pizete, J., & Casagrande, M. (2000). *Matérias-primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre as propriedades do produto final*. *Cerâmica Informação*, 10, 57-55.

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\\_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1).

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. Recuperado de <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1654>

Silva, J. B., Almeida, G. S., Lima, W. C. P. B., Neves, G. A., & de 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.312-315.971>

Su, S. L. (1997). Modeling of multi-phase moisture transfer and induced stress in drying clay bricks. *Applied Clay Science*, 12(3), 189-207. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(97\)00003-3](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(97)00003-3)

Silva, J. B., Almeida, G. S., Neves, G. A., Lima, W. C. P. B., Farias Neto, S. R., & Lima, A. G. B. (2012). Heat and mass transfer and volume variations during drying of industrial ceramic bricks: an experimental investigation. *Defect and Diffusion Forum*, 326-328, 267-272. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.267>

Silva, W. P., Farias, V. S. O., Neves, G. A., & Lima, A. G. B. (2012). Modeling of water transport in roof tiles by removal of moisture at isothermal conditions. *Heat and Mass Transfer*, 48(5), 809-821. <https://doi.org/10.1007/s00231-011-0931-4>

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. Obtido de <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/930>

Silva, V. S., Delgado, J. M. P. Q., Lima, W. M., & Lima, A. G. B. (2016). Heat and mass transfer in holed ceramic material using lumped model. *Diffusion Foundations*, 7, 30-52. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/df.7.30>

Silva, W. P., Silva, C. M. D. P., Silva, L. D., & Farias, V. S. O. (2013). Drying of clay slabs: Experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models. *Ceramics International*, 39(7), 7911-7919. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.03.053>

Sander, A., Skansi, D., & Bolf, N. (2003). Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs. *Ceramics International*, 29(6), 641-653. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00212-2](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00212-2)

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

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 30%

Eduarda Holanda Silva – 20%

Elisiane Santana de Lima – 5%

Ricardo Soares Gomez – 10%

Hortência Luma Fernandes Magalhães – 5%

Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva – 5%

Túlio Rafael Nascimento Porto – 5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima – 20%