

**Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão**

**Drying process of clay ceramic materials: a review**

**Proceso de secado de materiales cerámicos arcillosos: una revisión**

Recebido: 17/11/2020 | Revisado: 18/11/2020 | Aceito: 30/11/2020 | Publicado: 03/12/2020

**Ricardo Soares Gomez**

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

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: [ricardosoaresgomez@gmail.com](mailto: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](mailto:hortencia.luma@gmail.com)

**Túlio Rafael Nascimento Porto**

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [trporto@gmail.com](mailto:trporto@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](mailto:limaelisianelima@hotmail.com)

**Renato Alexandre Costa de Santana**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-7709>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [renatoacs@ufcg.edu.br](mailto:renatoacs@ufcg.edu.br)

**Kelly Cristiane Gomes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0255-8740>

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: [gomes@cear.ufpb.br](mailto:gomes@cear.ufpb.br)

**Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima**

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [wam\\_magno@hotmail.com](mailto:wam_magno@hotmail.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 secagem é uma operação de transferência de calor e massa envolvendo a remoção de umidade, sendo uma etapa importante e de elevado custo no processo de manufatura de diversos produtos. Para materiais cerâmicos, o processo de secagem é necessário para retirar a água que foi adicionada a argila na etapa de moldagem e conferir a resistência necessária para reduzir as chances de falhas durante a etapa de queima do produto. O controle do processo de secagem é essencial para reduzir defeitos no material, perda de produtividade e consumo energético. Devido à importância, esse trabalho tem por objetivo apresentar uma revisão de diversos tópicos relacionados com a secagem de materiais cerâmicos. Aqui são discutidos diferentes aspectos tais como: os fundamentos, as cinéticas de remoção de umidade, os defeitos, o controle e a otimização do processo de secagem, com ênfase a produtos de argila. A ideia é fornecer subsídios para que pesquisadores e industriais possam melhorar seus conhecimentos e tomar decisões apropriadas sobre este tópico de grande importância para a economia do país.

**Palavras-chave:** Cerâmica; Secagem; Qualidade; Controle; Otimização.

## **Abstract**

Drying is a heat and mass transfer operation involving the removal of moisture, being an important and expensive step in the manufacturing process of several products. For ceramic materials, the drying process is necessary to remove the water that was added to the clay in the molding step and to provide the necessary strength to reduce the chances of failure during the product firing step. Control of the drying process is essential to reduce defects in the material, loss of productivity and energy consumption. Due to its importance, this work aims to present a review of several topics related to the drying of ceramic materials. Here, different aspects are discussed, such as: the fundamentals, moisture removal kinetics, defects, control and optimization of the drying process, with emphasis on clay products. The idea is to provide subsidies so that researchers and industrialists can improve their knowledge and make appropriate decisions on this topic of great importance for the country's economy.

**Keywords:** Ceramics; Drying; Quality; Control; Optimization.

## Resumen

El secado es una operación de transferencia de calor y masa que implica la eliminación de la humedad, siendo un paso importante y costoso en el proceso de fabricación de varios productos. Para los materiales cerámicos, el proceso de secado es necesario para eliminar el agua que se agregó a la arcilla en el paso de moldeo y para proporcionar la resistencia necesaria para reducir las posibilidades de falla durante el paso de quemado del producto. El control del proceso de secado es fundamental para reducir defectos en el material, pérdida de productividad y consumo energético. Por su importancia, este trabajo tiene como objetivo presentar una revisión de varios temas relacionados con el secado de materiales cerámicos. Aquí se discuten diferentes aspectos, tales como: los fundamentos, cinética de remoción de humedad, defectos, control y optimización del proceso de secado, con énfasis en productos arcillosos. La idea es otorgar subsidios para que investigadores e industriales puedan mejorar sus conocimientos y tomar decisiones adecuadas sobre este tema de gran importancia para la economía del país.

**Palabras clave:** Cerámica; Secado; Calidad; Control; Optimización.

## 1. Introdução

O Brasil possui, atualmente, um parque industrial diversificado e moderno, apresenta um setor de agronegócios com grande produtividade e muito competitivo, possui um qualificado sistema de serviços e desenvolve negócios com praticamente todas as nações do mundo.

Nos últimos anos, a procura pelo produto brasileiro praticamente dobrou em alguns países do continente. Mesmo enfrentando momentos de turbulência econômica mundial, o setor ceramista brasileiro realiza excelentes negócios no mercado asiático. A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fizeram com que as indústrias cerâmicas brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial.

O Brasil é um dos maiores exportadores de revestimentos cerâmicos do mundo e a indústria brasileira vende seus produtos para mais de 110 países, tendo como destinos principais América do Sul, América Central, América do Norte e Caribe. No Brasil, as regiões que mais se desenvolveram foram a sudeste e a sul, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infraestrutura, melhor

distribuição de renda, associado ainda as facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nelas onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Convém salientar que as outras regiões do país têm apresentado certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente nos segmentos ligados a construção civil, o que tem levado a implantação de novas fábricas cerâmicas nessa região.

O setor de cerâmica vermelha é formado por um elevado número de indústrias com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e capacidades produtivas. Embora algumas empresas se destaquem no setor, o mesmo é caracterizado por um considerável número de pequenas e médias empresas, distribuídas ao longo de todo o país. Quanto ao nível tecnológico, algumas apresentam um elevado grau de desenvolvimento tecnológico em todo o processo de produção, seja na preparação da matéria-prima, na fabricação das peças, na secagem ou na queima. Entretanto esta não é a regra geral, e muitas empresas ainda estão num estágio bastante primitivo quanto à modernização. Por representar um setor de grande importância na geração de empregos e na distribuição de renda, tem merecido a atenção de setores do governo, institutos de pesquisa, universidades e entidades diversas. Diante disto, este trabalho tem como objetivo fornecer subsídios técnicos para os setores industrial e acadêmico relacionados com os materiais cerâmicos, com particular referência a secagem de peças cerâmicas confeccionadas com argila.

Trata-se de pesquisa qualitativa, com ênfase a um estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos argilosos, como classificada por Pereira et al. (2018). Nela discute-se tópicos relevantes de interesse da indústria e comunidade científica.

## **2. Materiais Cerâmicos**

### **Aspectos históricos**

Cerâmica ou material cerâmico é uma classe de material inorgânico e não metálico que é obtido após tratamento térmico em altas temperaturas (Silva et al, 2016). Esses materiais são obtidos a partir da queima da argila num formato específico (telhas, tijolos, blocos, pisos, artefatos artísticos e de decoração, etc.), e são largamente utilizados na construção civil. Segundo Brongniart (1844). A argila é a matéria prima que tem grande abundância na superfície da terra e, quando úmida, pode ser facilmente manuseada e moldada,

tendo sido utilizada em muitas aplicações práticas. Por apresentarem essas vantagens, a cerâmica surgiu em diversas civilizações, em períodos diferentes e em todos os continentes, já no final do período paleolítico (Boch & Niepce, 2010).

Várias descobertas arqueológicas indicam que as primeiras peças de material argiloso surgiram em Dolni Vestonice (sítio arqueológico da República Checa) por volta de 26000 a.C., depois na Sibéria em 12000 a.C., China em 11.000 a.C. e, também, na Mesopotâmia em 8.000 a.C (Boch & Niepce, 2010; Margueron, 2003; Vandiver, 1990).

A disseminação da cerâmica foi observada tanto na Ásia, quanto no Oriente Médio e Europa no final do período Neolítico, entre 7.000 e 6.000 a.C. (Boch & Niepce, 2010). Este fato coincide com o período em que o homem passa de nômade para a fase sedentária, ou seja, deixa de viver se deslocando de um lugar para o outro buscando moradia, alimento e outros recursos essenciais para sua sobrevivência, e passa a se fixar em um lugar, transição essa que foi possível graças à agricultura, caça, pesca e criação de gado. Com esse novo estilo de vida, os seres humanos sentiram a necessidade de armazenar água, alimento e sementes, utilizando casca de árvore, crânio de animais e, posteriormente, vasilhas cerâmicas para este fim (Kawaguti, 2005). Também foi nesse período que o homem teve a necessidade de criar espaços em busca de abrigo para se defender dos predadores, dos rigores da natureza e de seus próprios semelhantes, de tal forma que a sua sobrevivência dependia da segurança destes refúgios. Desta época, surgiram os primeiros tijolos e telhas cerâmicas, que ainda são largamente empregados na construção civil.

Até o final do século XIX, o sistema produtivo de peças cerâmicas passou, apenas por pequenas mudanças. Até esse período as peças eram confeccionadas manualmente, e se utilizava da secagem solar para desumidificar as peças. Após essa etapa, as peças eram submetidas a queima, em fornos denominados de caieira, que é, basicamente, um tipo de forno intermitente aquecido pela queima de biomassa, e de alto consumo de energia, o que conduz a um baixo desempenho energético. Somente a partir da Revolução Industrial e da introdução da primeira máquina a vapor, o sistema de produção começou a evoluir significativamente, mecanizando a operação de preparação e extrusão da argila, e aumentando a eficiência e capacidade de produção (Santos, 2001).

Outro avanço tecnológico considerável para a indústria cerâmica foi o surgimento do primeiro forno anular tipo Hoffman. Tal sistema de queima, revolucionário para a época, foi capaz de racionalizar a produção, reduzindo significativamente o consumo térmico dos fornos. Com este tipo de forno, foi possível controlar e regular a alimentação de combustível

e a quantidade de ar necessário para a combustão, além de aproveitar os gases de combustão para o pré-aquecimento das peças cerâmicas (Santos, 2001).

### **Processo de manufatura**

Na fabricação de peças cerâmicos de argila, água é adicionada à essa matéria prima com o objetivo de aumentar a sua plasticidade, permitindo e facilitando que peças sejam moldadas em diferentes formas sem rachar (Barbosa Da Silva et al. 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; Silva et al., 2016). Após a etapa de moldagem, a peça passa pela etapa de secagem, que consiste em um processo termodinâmico de transferência de calor e remoção da água livre da peça cerâmica (Silva et al., 2016). Nessa etapa, dependendo da quantidade de água contida nas peças, estas passam por profundas variações dimensionais, o que pode provocar defeitos no produto. Sendo assim, a água contida na peça deve ser removida cuidadosamente e de forma homogênea para minimizar a formação de trincas, deformações e outros tipos de defeitos (Batista, 2009).

A secagem é a etapa do processo de manufatura de produtos cerâmicos que precede a queima e utiliza uma quantidade apreciável de energia térmica para evaporar a água que foi adicionada durante a fase de moldagem (da Silva Almeida et al., 2013; Teixeira de Brito et al., 2016). É importante que as peças cerâmicas sejam submetidas ao processo de secagem para conferi-las resistência e consistência necessárias durante a etapa de queima (Cadé et al., 2005). Se a umidade do material não for removida na etapa de secagem, a temperatura extrema no forno irá forçar a saída da água durante o processo de queima, aumentando os riscos de formação de defeitos e poderá levar até a explosão do produto (Almeida et al., 2014; Barbosa Da Silva et al., 2011).

A etapa de secagem requer maior tempo e cuidado quando comparado com outras etapas do processo de produção de produtos cerâmicos (Itaya et al., 2005). O principal parâmetro para se obter um processo de secagem otimizado é a taxa de secagem (Batista, 2008). Taxas de secagem mais elevadas encurtam o tempo de processo, aumentando a produtividade, porém provocam maiores variações de volume nas peças que podem resultar no aparecimento de defeitos. A correta determinação e o controle deste parâmetro em cada instante de tempo do processo podem prevenir rachaduras, fissuras, deformações excessivas e empenamentos (Almeida et al., 2014; Silva et al., 2016). Neste artigo, este tópico será objeto de discussão posterior.

### 3. O Processo de Secagem

#### Fundamentos

O processo de secagem envolve vários fenômenos físicos que são responsáveis pela redução de umidade no material, como transferências de calor, massa e momento linear (Araújo et al., 2016) e variações dimensionais. Os três modos de transferência de calor são (Bergman et al., 2011; Brosnan & Robinson, 2003; Cengel, 2007):

- Condução (transferência de calor em um meio estacionário, que pode ser sólido ou líquido, devido a um gradiente de temperatura);
- Convecção (transferência de calor entre a superfície de um sólido e um fluido em movimento que estão em temperaturas distintas);
- Radiação (transferência de calor entre um corpo e outro por ondas eletromagnéticas).

A secagem é um processo acompanhado do deslocamento da umidade do interior do material em direção a superfície, evaporação da umidade e contrações no objeto (Kowalski, 2012). Tais contrações devem ser minimizadas durante o processo para evitar o surgimento de defeitos no produto. Desta forma, a secagem é influenciada por condições externas, como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem (Ford, 2013). Além disto, propriedades do material, como as difusividades térmica e de massa e os coeficientes de expansão térmica e de difusão umidade (Keum et al., 2000) também influenciam no processo.

O teor de umidade representa a quantidade de água contida em um material e representa um parâmetro de grande importância na secagem. A curva de secagem, por exemplo, é um gráfico que relaciona o teor de umidade do produto em função do tempo.

As duas formas de representar o teor de umidade são em base seca e em base úmida, como segue (Brosnan & Robinson, 2003):

$$\text{Teor de umidade (\% base seca)} = \frac{\text{Massa da água na amostra}}{\text{Massa da amostra seca}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Teor de umidade (\% base úmida)} = \frac{\text{Massa da água na amostra}}{\text{Massa da amostra úmida}} \times 100\% \quad (2)$$

onde a massa seca é a massa final do material após a remoção da água no processo de secagem até que a peça atinja um peso constante, e massa úmida é a massa da peça cerâmica medida em qualquer tempo durante o processo de secagem.

É muito mais comum utilizar o teor de umidade em base seca que, de acordo com (Ford, 2013), facilita o entendimento de alterações físicas que ocorrem durante a secagem, como o encolhimento.

É uma prática comum utilizar o teor de umidade médio adimensional em função do tempo de processamento (Araújo, 2016; Barbosa Da Silva et al., 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008; Silva et al., 2016; Teixeira de Brito et al., 2016). Esse parâmetro de secagem, em cada instante de tempo pode ser determinado como segue:

$$\overline{M^*} = \frac{\overline{M} - \overline{M}_e}{\overline{M}_0 - \overline{M}_e} \quad (3)$$

onde  $\overline{M}$  é o teor de umidade médio em cada instante de tempo,  $\overline{M}_e$  é o teor de umidade de equilíbrio médio e  $\overline{M}_0$  é o teor de umidade médio inicial.

O teor de umidade no final do processo de secagem, ou teor de umidade de equilíbrio, praticamente nunca é igual a zero, sendo fortemente dependente da umidade relativa do meio ambiente e da temperatura de processo. Zagrouba et al. (2002) realizaram, experimentalmente, processos de secagem de amostras de argila variando as condições operacionais observando que o aumento na umidade relativa do ar de secagem implica em um aumento no teor de umidade de equilíbrio médio.

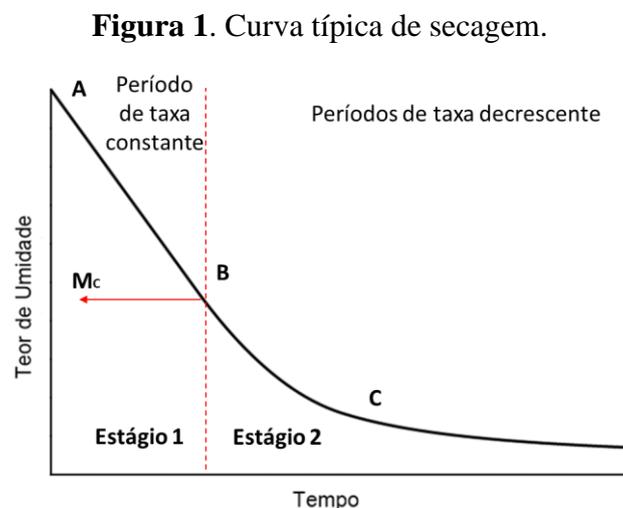
Na secagem, a água deve mover-se do interior da peça até a superfície, onde ela evapora e é levada pela massa de ar (corrente de ar) no secador (Brosnan & Robinson, 2003). Contudo, o fenômeno da migração de umidade dentro de meios porosos durante o processo de secagem ainda não é bem conhecido (Silva et al., 2016). Alguns autores (Barbosa da Silva et al., 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; de Lima et al., 2016; Hasatani et al., 1992; Itaya et al., 1997; Ketelaars et al., 1992), talvez por efeito de simplificação, consideram que, durante a secagem, o mecanismo de migração de umidade dominante é o transporte por difusão líquida. Entretanto, outros pesquisadores (Batista et al., 2009; Ford, 2013; Su, 1997; Van der Zanden et al., 1996a; Van Der Zanden, 1996b) afirmam que o transporte de umidade acontece tanto na forma líquida quanto na forma de vapor, cada um predominando em certas etapas da secagem. Esses autores sugerem que o mecanismo de migração de umidade no interior do meio poroso é dominado pelo transporte por difusão líquida durante boa parte do processo de secagem e que, somente no final do processo, em que as temperaturas são elevadas e o teor de

umidade é baixo, o transporte de umidade acontece na forma de vapor, ou seja, a evaporação da água ocorre nos poros do material. Mais especificamente no segundo período de taxa decrescente, a água contida nos poros é insuficiente para a migração líquida continuar e a migração da umidade na forma de vapor passa a ocorrer de forma predominante (Ford, 2013).

### Curvas de secagem

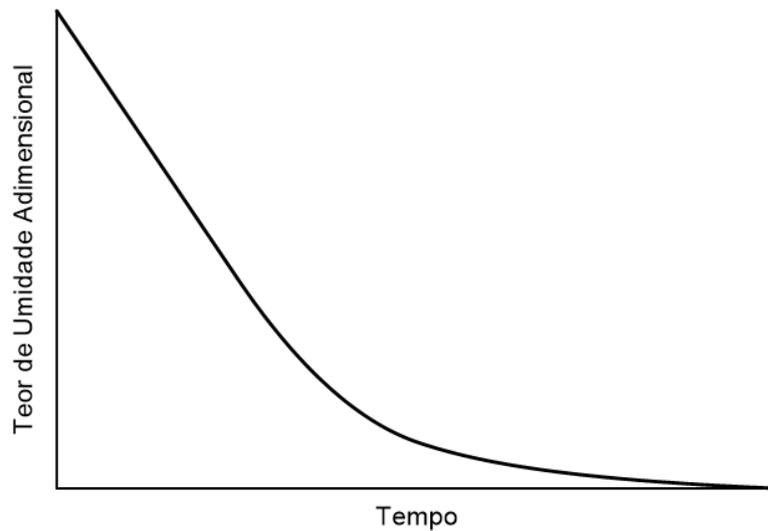
Diversos autores relatam que a curva de secagem pode ser dividida em um estágio de taxa constante e um estágio de taxa decrescente (Araújo et al., 2016; Brosnan & Robinson, 2003; Ford, 2013; Fortes & Okos, 1980; Khalili et al., 2014; Kowalski, 2012). Se o teor de umidade for plotado em função do tempo de processamento, obtém-se uma curva de secagem semelhante as que estão mostradas nas Figuras. 1 e 2. A curva da taxa de secagem, obtida através do coeficiente angular da curva de secagem em cada instante de tempo, é muito útil na análise do processo de secagem (Kowalski, 2012) e apresenta um comportamento semelhante ao ilustrado na Figura 3. Pelas Figuras 1 e 2, observa-se que a curva de secagem pode ser dividida em três períodos distintos (Ford, 2013):

- Período de taxa constante, no qual a taxa de evaporação da água contida no produto a ser secado independe do teor de umidade;
- Primeiro período de taxa decrescente, em que a taxa de secagem é uma função linear do teor de umidade.
- Segundo período de taxa decrescente, no qual a taxa de secagem apresenta uma relação curvilínea com o teor de umidade.



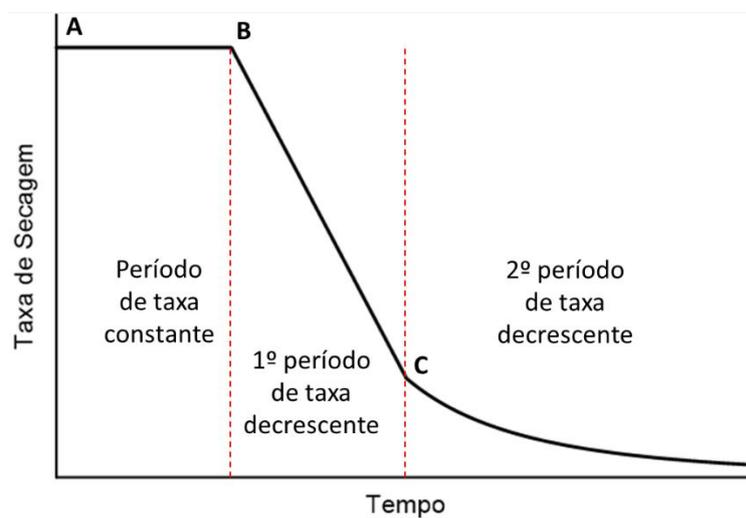
Fonte: Autores (2020).

**Figura 2.** Curva típica de secagem representada na forma do teor de umidade adimensional.



Fonte: Autores (2020).

**Figura 3.** Curva típica da taxa de secagem.



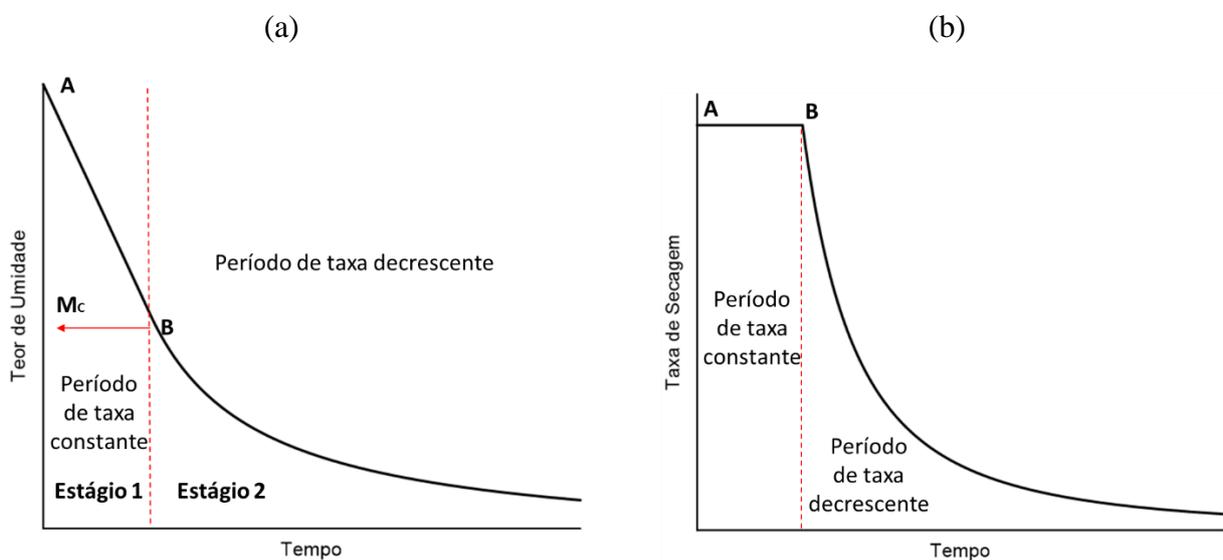
Fonte: Autores (2020).

Em alguns casos, dependendo das condições de secagem e do tipo de material, não é possível diferenciar o primeiro e o segundo período de taxa decrescente de tal forma que a curva de secagem é dividida em um período de taxa constante e um único período de taxa decrescente (Figura 3).

Quando a curva da taxa de secagem intercepta o eixo das abcissas (Figura 1), significa que a transferência líquida de umidade do produto para o meio de secagem é nula e, conseqüentemente, o equilíbrio é atingido.

O teor de umidade no ponto B nas Figuras 1, 3 e 4 é conhecido como o teor crítico de umidade ( $M_c$ ). Além de ser o ponto de transição entre o estágio de taxa constante e o estágio de taxa decrescente, o ponto B é caracterizado pela redução significativa do fenômeno de encolhimento do produto a ser secado. Por isso, quando o produto cerâmico ultrapassa o ponto B, a secagem pode ser conduzida sem medo de produzir grandes deformações, trincas, empenamentos ou outros tipos de falhas provenientes do processo de secagem (Brosnan & Robinson, 2003; Khalili et al., 2014).

**Figura 4.** Curvas de secagem (a) e taxa de secagem (b) com apenas um período de taxa decrescente.



Fonte: Autores (2020).

No período de taxa constante, a taxa de evaporação da umidade é função das condições externas e independe do material a ser secado (Ford, 2013). A taxa de evaporação na superfície é determinada pela taxa de difusão do vapor de água através da película estacionária de ar no entorno do material (camada limite de concentração). A taxa de difusão, por sua vez, é proporcional a diferença entre a pressão parcial do vapor de água na superfície do material e a pressão parcial de vapor do ar de secagem (Araújo et al., 2016). Além disso, a taxa de difusão cresce com o aumento da velocidade do ar de secagem devido à elevação do coeficiente de transferência de calor por convecção (Araújo et al., 2016).

Durante o primeiro estágio de secagem, a superfície do material se comporta como uma superfície de água livre de tal forma que a água fluindo do interior do objeto até a superfície ocorre em uma taxa suficiente para manter a superfície úmida (Ford, 2013). A

magnitude do primeiro estágio de secagem depende das diferenças de temperatura e de umidade relativa entre o ar de secagem e a superfície úmida do sólido. Além disso, depende da área do material exposta ao ar de secagem, da geometria e dos coeficientes de transferência de calor e massa (Araújo et al., 2016).

Se a secagem é acelerada de forma demasiada no primeiro estágio de secagem, ocorrerá uma notável e imediata redução da taxa de secagem no segundo estágio, devido ao ressecamento da superfície, além de deformação indesejada, formação de rachadura e outras falhas que reduzem significativamente a qualidade do material pós-secagem (Itaya & Hasatani, 1996). Dessa forma, no período de taxa constante é comum empregar as mais baixas temperaturas e mais elevadas umidades relativas do ar de secagem. É importante ressaltar que, uma vez que encerrado o primeiro estágio, a estratégia de secagem muda, uma vez que o encolhimento é reduzido drasticamente nos períodos de taxa decrescente (Brosnan & Robinson, 2003).

Após o ponto B ser alcançado (Figuras 1, 3 e 4), inicia-se o primeiro período de taxa decrescente. Em tal período de secagem, água líquida ainda se move do interior para a superfície do produto e a evaporação ainda ocorre a partir da superfície, embora a mesma não mais se comporte como água livre (Ford, 2013). Dessa forma, a taxa de difusão dentro do objeto a ser secado controla a taxa de secagem (Brosnan & Robinson, 2003), dependendo fortemente das condições de transporte de umidade dentro do material (Kowalski, 2012). Por este fato, aliado com a redução significativa do encolhimento após ultrapassado o teor crítico de umidade ( $M_c$ ), é comum aumentar a temperatura e a velocidade do ar para acelerar o processo de secagem (Brosnan & Robinson, 2003).

No segundo período de taxa decrescente, a água residual nos capilares e a água da superfície é totalmente removida (Brosnan & Robinson, 2003). Desta forma, a evaporação passa a ocorrer dentro do sólido e o vapor atinge a superfície por difusão através dos poros (Ford, 2013). A taxa de difusão dentro do objeto a ser secado continua controlando a taxa real de eliminação da umidade. Outra característica do segundo estágio de secagem é o aumento contínuo da temperatura do produto, a partir da temperatura de bulbo úmido até a temperatura do meio de secagem (equilíbrio térmico) (Kowalski, 2012).

Em uma situação na qual o único mecanismo de transferência de calor entre o ambiente e a peça cerâmica é a convecção, tem-se no período de taxa de secagem constante que (Brosnan & Robinson, 2003):

- A temperatura da superfície do produto é a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, fato observado por diversos pesquisadores (Banaszak & Kowalski, 2005;

Hasatani et al., 1992; Hasatani et al., 1993; Itaya et al., 1997; Mihoubi et al., 2004; Zagrouba et al., 2002);

- A entalpia do ar na superfície do produto é a entalpia estabelecida pela temperatura de bulbo úmido do ar de secagem.

Alguns autores observaram que a temperatura média no primeiro estágio de secagem foi maior que a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem devido ao efeito da transferência de calor por radiação pelas paredes do secador (Itaya et al., 1995; Itaya et al., 1999).

#### **4. Secagem de Materiais Cerâmicos**

##### **Aspectos gerais**

Uma amostra de argila pode ser classificada como meio poroso, ou seja, contém poros em seu interior, onde esses poros são tipicamente preenchidos por um fluido líquido ou gasoso (Kowalski, 2012). O líquido mais comum é a água, que pode ser classificada em água livre ou água ligada (Araújo et al., 2016). A água livre é composta de moléculas de água presentes nos poros do material e são facilmente extraídas durante o processo de secagem. As moléculas de água que não podem ser extraídas facilmente, mesmo pelo processo de secagem, são denominadas de água ligada ou água de constituição.

De acordo com Kowalski (2012), a secagem pode ser realizada termicamente, mecanicamente e físico-quimicamente. A secagem mecânica permite reduzir apenas uma parte da umidade (água livre) e o método de secagem físico-químico é realizado utilizando agentes químicos para absorver a água do produto. Este último método não tem aplicações industriais e, portanto, não serão abordados neste artigo. Diante deste fato, a secagem térmica é comumente entendida como um processo que utiliza algum tipo de energia térmica com a finalidade de reduzir o teor de umidade de um corpo. Tal energia térmica pode ser fornecida para o produto por uma corrente de ar quente (secagem por convecção), por radiação solar (secagem solar), por micro-ondas, por infravermelho, por contato entre as partículas, como também por uma combinação entre elas. Além disso, os parâmetros do processo como velocidade, temperatura e umidade relativa do ar de secagem, podem variar ao longo do tempo, caracterizando-se, assim, uma secagem intermitente. Na secagem por convecção, método mais empregado nas indústrias cerâmicas, o ar quente transfere calor para o material e

absorve o vapor de água do mesmo, fazendo com que ocorra uma transferência simultânea de calor e massa (Kowalski, 2012).

### **Aspectos energéticos do processo de secagem**

A secagem é uma etapa bastante importante para o processamento de grãos, frutas, legumes, têxteis, papel, madeira, pós, cerâmica, minerais, produtos farmacêuticos, e polímeros (Araújo et al., 2016; Defraeye, 2014; Kowalski, 2012; Silva et al., 2016), entre outros materiais, representando aproximadamente de 10 a 25% do consumo nacional de energia nos processos industriais (Defraeye, 2014). Com o avanço da tecnologia aplicada ao setor industrial, aprimoramento das técnicas relacionadas ao processo produtivo e, com isto, um aumento da produtividade, os custos energéticos são responsáveis por grande parte do custo total de produção das indústrias.

De forma geral, as peças cerâmicas podem ter seu teor de água reduzido de maneira natural ou artificial. Na secagem natural as peças são secadas em galpões cobertos, sendo dispostas em prateleiras ou simplesmente empilhadas no chão (Araújo et al., 2016; da Silva Almeida et al., 2013). A duração da secagem depende de fatores como temperatura e umidade relativa do ar de secagem, geometria da peça e ventilação do local, podendo levar períodos de até seis semanas (Araújo et al., 2016; da Silva Almeida et al., 2013). Com o objetivo de reduzir o tempo de secagem para valores entre 12 e 40 horas (Araújo et al., 2016; da Silva Almeida et al., 2013), a secagem artificial é largamente empregada na produção de produtos cerâmicos. A mesma é realizada em estufas ou câmaras de secagem, geralmente utilizando o calor residual proveniente dos fornos na etapa de queima para obtenção de uma maior eficiência energética do processo (Araújo et al., 2016; da Silva Almeida et al., 2013; Silva et al., 2016). Na secagem artificial, a temperatura do ar varia entre 50 e 100°C e a umidade relativa geralmente excede 80%.

Alves et al. (2008) indicam que o processo de secagem de revestimentos cerâmicos tem uma participação de cerca de 30% no consumo de energia térmica, enquanto que o processo de queima é responsável pelos outros 70%. Esses valores são bem representativos e deve ser bastante considerado na análise do processo de manufatura de peças cerâmicas.

Brosnan e Robinson (2003) e Reed (1995) indicam que, ao se tomar os devidos cuidados durante a operação de secagem é possível minimizar o custo com energia térmica, além de obter um produto de melhor qualidade.

### **Aspectos mecânicos: tensões induzidas pelo processo de secagem**

No início do processo de secagem, as partículas de argila estão separadas umas das outras por uma fina película de água. Com o progresso da secagem e a remoção da água, a separação interpartículas diminui, gerando contrações no material e, conseqüentemente, surgem tensões induzidas pelo processo de secagem (Augier et al., 2002; Callister Jr & Rethwisch, 2012; Callister Jr & Rethwisch, 2011; Kingery et al., 1976).

Quando a taxa de eliminação da água pela superfície do material for maior que a taxa de difusão de água no interior do sólido, tem-se que a superfície secará mais rapidamente que o interior, bem como encolherá de forma mais intensa (Almeida et al., 2014; Barbosa da Silva et al., 2012). Esse fato, aliado com a baixa resistência da argila antes do processo de queima, pode levar a formação de rachaduras no material, caso a tensão no seu interior supere a tensão de resistência do material (Brosnan & Robinson, 2003; Cadé et al., 2005; Khalili et al., 2014). O encolhimento diferencial entre partes do corpo também pode ocorrer devido a fatores operacionais, como o fluxo de ar irregular durante o processo de secagem (Brosnan & Robinson, 2003).

Um fato característico dos produtos cerâmicos é que durante o processo de secagem, a argila pode sofrer contrações significativas podendo resultar em mudanças na forma do produto, o que é um importante parâmetro de qualidade (Itaya et al., 1999). Quando a distribuição das tensões não é adequada em partes do material, obtém-se deformações e/ou falhas que podem comprometer a utilização do produto (Mihoubi et al., 2004).

A análise dos campos de temperatura e umidade relativa no interior do produto permite verificar regiões com maior probabilidade de ocorrer trincas, rachaduras e deformações elevadas. De acordo com diversos pesquisadores (Almeida et al., 2014; Araújo et al., 2016; Araújo et al., 2017; Augier et al., 2002; Barbosa da Silva et al., 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008; Brosnan & Robinson, 2003; Cadé et al., 2005; da Silva Almeida et al., 2013; Hasatani et al., 1993; Khalili et al., 2014; Silva et al., 2016; Teixeira de Brito et al., 2016), regiões com maiores gradientes de umidade e temperatura estão mais susceptíveis ao fenômeno de encolhimento e, conseqüentemente, a formação de elevadas tensões que levam ao surgimento de falhas.

Além disso, foi observado em diversas pesquisas que os maiores gradientes de temperatura e umidade ocorreram nos cantos (vértices) dos produtos cerâmicos (Almeida et al., 2014; Araújo et al., 2016, 2017; Augier et al., 2002; Barbosa da Silva et al., 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008; Cadé et al., 2005; Khalili et al.,

2014; Teixeira de Brito et al., 2016), de tal forma que tais regiões estão mais propensas a formação de rachaduras e fissuras.

### **Aspectos de qualidade do produto cerâmico: defeitos do processo de secagem**

O processo de secagem é a principal fonte de defeitos na maioria dos produtos cerâmicos (Brosnan & Robinson, 2003; Khalili et al., 2014). Se a secagem não for conduzida de forma controlada, diversos tipos de defeitos podem ocorrer durante o processo de secagem, tais como rachaduras, empenamento, descoloração, redução das propriedades mecânicas, entre outros (Brosnan & Robinson, 2003; Teixeira de Brito et al., 2016). Tais defeitos levam a redução da qualidade ou perda do produto, causando danos econômicos e ambientais para as indústrias cerâmicas, haja vista que o processo de secagem é responsável por um elevado consumo energético e parte desse produto pode não ser reaproveitado (Itaya et al., 2001; Mihoubi et al., 2004; Teixeira de Brito et al., 2016).

Em geral, os defeitos oriundos do processo de secagem são devidos ao encolhimento diferencial do material, que podem ter várias causas (Brosnan & Robinson, 2003; Ford, 2013; Itaya et al., 2001; Itaya & Hasatani, 1996):

- Taxa de perda de umidade e aquecimento do corpo;
- Formação de gradientes de umidade e temperatura no corpo;
- Encolhimento anisotrópico devido a orientação das partículas durante a moldagem;
- Restrição mecânica do encolhimento devido ao contato com a superfície em que o mesmo está apoiado;
- Ressecamento da superfície proveniente de uma elevada taxa de secagem no primeiro estágio de secagem.

Em compensação, nem todo defeito ocasionado nos produtos cerâmicos é resultante do processo de secagem, podendo ser causados pela seleção errônea da matéria-prima, procedimentos de mistura e conformação, bem como forma do produto (Brosnan & Robinson, 2003). Portanto, a simples modificação da matéria-prima, bem como a otimização do projeto e dos processos de manufatura podem fazer com que a taxa de secagem e aquecimento das peças ocorram de forma mais rápida e sem causar danos ao produto final.

Uma característica do produto que pode ter grande influência na formação de rachaduras durante o processo de secagem são as seções com espessuras distintas (Brosnan & Robinson, 2003). O problema acontece pelo fato de uma mesma taxa de secagem ser aplicada

para ambas as seções, embora a seção de maior espessura contenha mais água a ser removida. Isso faz com que a remoção de água ocorra de forma mais rápida na seção de menor espessura levando a um gradiente de contração entre as mesmas. Esse gradiente de contração implica na formação de tensões mais elevadas, podendo causar defeitos no material. De maneira geral, quanto maior, mais pesada e mais irregular a peça, maiores são as chances de aparecimento de defeitos durante o processo de secagem.

### **Controle do processo de secagem**

O principal objetivo na produção de cerâmica é minimizar a contração durante o processo de secagem, de modo a reduzir a intensidade das tensões mecânica e térmica no interior da peça, minimizando os defeitos (Brosnan & Robinson, 2003) e maximizando a qualidade do produto. Desta forma, o controle da formação de tensões torna-se fundamental para as indústrias de produtos cerâmicos que desejam se manterem competitivas no mercado.

Apesar de muitos autores atribuírem a formação de tensões e deformações aos gradientes de temperatura e de umidade, outros autores sugerem que é importante realizar análise de tensão-deformação simultaneamente com as transferências de calor e massa (Itaya et al., 1999, 2001). Desta forma, modelagens e simulações precisas do fenômeno do encolhimento e da formação de tensões durante a secagem podem ser utilizados para prever a ocorrência de defeitos bem como para projetar precisamente a peça e desenvolver processos de secagem com maiores taxas, menores consumos de energia e, portanto, mais eficientes (Itaya et al., 1999; Khalili et al., 2014).

Para obtenção do perfil de temperatura, distribuição de umidade, formação de tensões e deformações em produtos cerâmicos, diversos pesquisadores desenvolveram formulações matemáticas utilizando diferentes métodos numéricos de solução de equações diferenciais (elementos finitos, volumes finitos, etc.) (Augier et al., 2002; Comini & Lewis, 1976; Hasatani et al., 1992; Itaya et al., 1995, 1999, 2001, 2007; Keum et al., 2000; Khalili et al., 2014).

A geração de trincas e deformações da argila moldada são problemas indesejáveis durante a secagem. Além disso, a magnitude das tensões durante o processo de secagem é função das propriedades termo-físicas e elásticas, bem como dos coeficientes de contração e expansão do material (Barbosa da Silva et al., 2011; Itaya et al., 1997). Portanto, para compreender e otimizar o processo de secagem de peças cerâmicas, é necessário conhecer as propriedades mecânicas da argila úmida. Dados experimentais para alguns tipos de argila

estão disponíveis na literatura (Etuk et al., 2003; Shiraki, 1955a, 1955b; Shiraki & Fukuura, 1955; Shiraki & Komaki, 1955).

De acordo com a literatura (Almeida et al., 2014; Araújo et al., 2016, 2017; Augier et al., 2002; Barbosa da Silva et al., 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008; Cadé et al., 2005; Khalili et al., 2014; Itaya & Hasatani, 1996; Reed, 1995; Teixeira de Brito et al., 2016), as variáveis operacionais que influenciam no processo de secagem são: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, tempo, forma, espessura, relação área/volume, granulação, umidade inicial e propriedades do material cerâmico. O entendimento de tais variáveis torna-se muito importante para determinação da curva ideal de secagem para cada tipo de produto. A forma com que cada variável operacional influencia na secagem de produtos cerâmicos foi objetivo de estudo de diversas pesquisas, como segue:

- Os mecanismos de transferência de massa, calor e o fenômeno do encolhimento (shrinkage) são mais intensos em peças com umidade inicial alta e, principalmente, em materiais cerâmicos de granulação fina (Almeida et al., 2014; Barbosa da Silva et al., 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008; Itaya & Hasatani, 1996; Reed, 1995);
- Maior temperatura do ar de secagem implica em uma maior taxa de secagem e, conseqüentemente, menor tempo total de processo (Almeida et al., 2014; Barbosa da Silva et al., 2012; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008; Khalili et al., 2014);
- Menor umidade relativa do ar de secagem resulta em uma secagem mais rápida do material (Almeida et al., 2014; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008);
- Quanto maior a velocidade do ar de secagem, maior é o gradiente de temperatura no material cerâmico (Araújo et al., 2016);
- Quanto maior o tempo de secagem menor será o teor médio de umidade, em qualquer ponto dentro do sólido (Almeida et al., 2014; Barbosa da Silva et al., 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; Khalili et al., 2014);
- A forma do corpo interfere na cinética de secagem. Quanto maior a relação área/volume, mais rápida será a secagem (Barbosa da Silva et al., 2012; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008; Cadé et al., 2005; Khalili et al., 2014; Silva et al., 2016);
- Maiores níveis do teor de umidade inicial implicam em maiores índices de retração volumétrica (Batista et al., 2009; Batista et al., 2008);

- As difusividades térmica e de massa influenciam fortemente nas transferências de calor e massa, durante a secagem, sendo responsáveis pela velocidade com que cada processo ocorre (Silva et al., 2016);
- As áreas próximas aos vértices (cantos) do produto cerâmico apresentam as maiores taxas de transferência de calor e massa (Almeida et al., 2014; Araújo et al., 2016, 2017; Augier et al., 2002; Barbosa Da Silva et al., 2011; Barbosa da Silva et al., 2012; Batista et al., 2009; Batista et al., 2008; Cadé et al., 2005; Khalili et al., 2014; Teixeira de Brito et al., 2016). Tais regiões estão mais susceptíveis a formação de defeitos;
- Como mencionado anteriormente, elevadas temperaturas do ar de secagem e baixas umidades relativas são condições operacionais que influenciam numa secagem mais rápida do material. Estes efeitos são, por sua vez, mais acentuados que os gerados pela relação área/volume e pelo teor de umidade inicial (Batista et al., 2009; Batista et al., 2008). É válido ressaltar que, quando a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem são aplicadas para diferentes peças cerâmicas, o teor de umidade inicial e a relação área/volume dominam a cinética de secagem (Batista et al., 2009; Batista et al., 2008).

### **Otimização do processo de secagem**

Após ter definido a curva de secagem ótima para o produto cerâmico, seja de forma experimental ou através de modelagem matemática, e as variáveis (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem) necessárias para obter tal curva de secagem, torna-se de grande importância realizar o controle do processo. O controle é crucial para garantir que a curva de secagem previamente estabelecida seja alcançada na prática, bem como para obtenção de uma secagem uniforme no produto, que pode evitar danos estruturais durante o processo de queima (Araújo et al., 2016).

Como os defeitos são afetados pelos gradientes de umidade e de temperatura, e coeficientes de expansão térmica e de expansão de umidade (Keum et al., 2000), e as propriedades do material não podem ser controladas durante o processo, é necessário que a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar sejam controladas durante a secagem para minimizar a intensidade das tensões e evitar falhas no produto.

A secagem uniforme é difícil de ser realizada, porque a temperatura, velocidade e a umidade relativa do ar de secagem, bem como os coeficientes locais de transferência de calor e massa são muitas vezes dependentes da localização e posição da peça no secador industrial

(Itaya & Hasatani, 1996). Fato este observado por Almeida et al. (da Silva Almeida et al., 2013), que estudaram a secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador do tipo túnel e com fluxo cruzado em escala industrial. Os autores observaram que os tijolos da primeira fileira da vagoneta secam e aquecem um pouco mais rápido quando comparado com os da última fileira. Isso é justificado pelo fato de que o ar de secagem próximo aos tijolos da primeira fila contém baixa umidade absoluta e, à medida que vai penetrando nas filas subsequentes de produto vai ficando saturado, de tal forma que a umidade relativa do ar de secagem varia de uma posição para outra dentro do secador. Outro fato observado na literatura é que o posicionamento da peça em relação ao fluxo de ar pode causar gradientes de contração diferenciados que podem levar ao empenamento no material (Silva et al., 2016).

É importante ressaltar que até o deslocamento dos produtos do secador para o forno (processo de queima) deve ser realizado de maneira controlada. Dependendo do tipo de argila, se o tempo necessário para deslocar as peças de um equipamento para outro for elevado e o ambiente estiver com umidade relativa alta, é provável que aconteça um processo de reidratação que pode provocar quebras e/ou explosões quando o material entra no forno e aquece intensamente (Silva et al., 2016).

Para aperfeiçoar o processo de secagem de materiais cerâmicos, algumas técnicas têm sido usadas, como secagem intermitente, secagem por aquecimento volumétrico, e por micro-ondas. Estas técnicas serão discutidas na sequência.

### **a) Secagem intermitente**

A secagem intermitente é um método alternativo de secagem em que as condições operacionais variam ao longo do processo. Isto pode ser alcançado variando a umidade relativa, a temperatura e a pressão do ar de secagem, ou o modo de fornecimento de energia (ex. aquecimento por convecção, radiação, micro-ondas) (Kumar et al., 2014).

A secagem intermitente oferece algumas vantagens quando comparado com a secagem contínua (Cihan et al., 2007). A sua principal vantagem é o custo, sendo considerado um dos processos de secagem mais eficientes em termos energéticos (Kumar et al., 2014). Essa vantagem pode ser explicada pela redução do uso de energia térmica, bem como da massa de ar usada quando comparado com a secagem convectiva contínua (Chua et al., 2003).

Kowalski e Pawlowski (2011) analisaram a secagem intermitente de uma amostra de argila caulim variando a temperatura e a umidade do ar de secagem tanto numericamente quanto experimentalmente. Foi observado que, modificando as condições de secagem nos

momentos apropriados, pode-se evitar a fratura do material, garantindo um produto de boa qualidade. O produto com melhor qualidade foi obtido variando a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, esse método apresentou um consumo energético significativamente maior quando comparado com os outros analisados. Na secagem intermitente, variando-se a temperatura ao longo do processo, os pesquisadores concluíram que é possível obter um produto de melhor qualidade e menor consumo energético quando comparado com a secagem contínua sem um prolongamento significativo do tempo total de secagem.

Itaya et al. (Itaya et al., 1999, 2001, 2007) estudaram a influência da secagem intermitente na formação de tensões em peças cerâmicas. A distribuição tridimensional da tensão-deformação foi obtida numericamente utilizando o método dos elementos finitos. Foi observado que a temperatura e o teor de umidade na secagem intermitente flutuam acima e abaixo dos resultados obtidos na secagem contínua. Além disso, a tensão máxima na secagem intermitente oscilou bastante e a tensão de pico, em cada ciclo, excedeu além da magnitude obtida na secagem contínua. Tem-se, portanto, que a secagem intermitente pode não ser sempre mais vantajosa para a secagem de peças cerâmica quando comparada com a secagem contínua. Por isso, para evitar falhas durante o processo de secagem intermitente, é de suma importância controlar as tensões de pico para evitar que as mesmas alcancem a tensão de resistência do material.

Os resultados obtidos pelos pesquisadores estão de acordo com o fato de que o fornecimento de calor intermitente é benéfico apenas para materiais que secam principalmente no período de taxa decrescente, em que as difusões internas de calor e umidade controlam a taxa geral de secagem (Chua et al., 2003). Portanto, não é recomendado utilizar aquecimento intermitente no primeiro estágio de secagem para materiais cerâmicos, haja vista que a taxa de secagem deve ser suficientemente lenta para evitar o desenvolvimento de tensões elevadas que podem comprometer sensivelmente a qualidade da peça. É importante ressaltar que a secagem intermitente já é um método bastante difundido na secagem de alimentos (Kumar et al., 2014) e bioprodutos (Chua et al., 2003).

Outro fato interessante observado por Itaya et al. (1999) é que, na secagem intermitente, o perfil de temperatura no período de menor número de Biot é mais elevado quando comparado com o período de maior número de Biot. Como o número de Biot é diretamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor por convecção, tem-se que, para baixos números de Biot, a contribuição da transferência de calor por radiação pelas paredes do secador é significativamente maior. Com isso, a temperatura da superfície da

amostra úmida é maior que a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem já no estágio inicial do processo de secagem.

#### **b) Secagem por aquecimento interno**

Itaya et al. (2001, 2005) estudaram o comportamento da secagem de peças cerâmicas utilizando diferentes modos de aquecimento, dentre eles convecção contínua, convecção intermitente e aquecimento interno. A distribuição tridimensional das tensões e deformações, e as transferências de calor e de umidade na peça moldada foram resolvidas simultaneamente pelo método dos elementos finitos durante todo o processo transiente de secagem.

Os pesquisadores observaram que, na secagem por aquecimento interno, a temperatura da superfície é menor quando comparada com a temperatura no interior do corpo, diferentemente do que acontecem nos demais processos de secagem, em que a temperatura decresce no sentido da superfície para o centro do corpo. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que a superfície da peça perde calor por evaporação e/ou convecção para o ambiente de menor temperatura (Itaya et al., 2001, 2007), reduzindo assim sua temperatura local. Outro fato observado pelos pesquisadores é que o aquecimento interno apresenta um aumento na taxa de secagem e na temperatura média do corpo quando comparado com os outros modos de secagem, embora a taxa de aquecimento no modelo seja considerada semelhante em todos os casos.

Quando a peça moldada é aquecida internamente, a pressão de vapor interna tende a aumentar, sendo responsável por um aumento do movimento da umidade que resulta em um aumento na taxa de secagem (Itaya et al., 2007).

Por fim, foi constatado que a secagem por aquecimento interno apresentou tensões máximas de tração inferiores que aquelas obtidas na secagem por convecção, sendo assim, apontado pelos pesquisadores como o modo mais eficiente para secagem da peça cerâmica, sob a consideração de que a tensão máxima de tração esteja relacionada à causa da geração de falhas. A razão para a menor formação de tensões no modo de aquecimento interno é explicada pelos pesquisadores da seguinte forma: A secagem por convecção acontece rapidamente nos cantos da peça, que por sua vez apresentam os maiores valores de temperatura, bem como maiores gradientes de umidade e temperatura. No entanto, quando o corpo é aquecido internamente (volumetricamente), a temperatura, a taxa de secagem e, conseqüentemente as tensões são reduzidas nos cantos da peça (Itaya et al., 2001, 2007).

### c) Secagem por micro-ondas

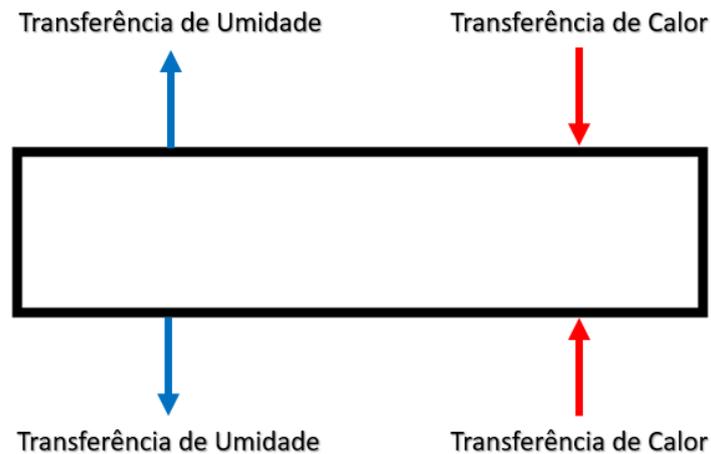
Aquecimento por micro-ondas é considerado como um candidato promissor na secagem por aquecimento interno (Itaya et al., 2001, 2005, 2007). Diversas aplicações de secagem por micro-ondas são relatadas na literatura, tais como: cerâmicas, pós, grânulos, blocos, folhas, alimentos, massas, madeira, plásticos, têxteis, produtos farmacêuticos, etc (Clark & Sutton, 1996; Edgar & Osepchuk, 2001; Itaya et al., 2005, 2007; Osepchuk, 2002). Tecnologias de radiação, como micro-ondas, são especialmente interessantes em operações de secagem por permitir entrada de energia imediata e significativa para o produto (Mihoubi & Bellagi, 2009).

As secagens por convecção e por micro-ondas diferenciam-se uma da outra pelo modo de transferência de calor. Na secagem por convecção, o calor é fornecido pelo ar quente em contato com as superfícies do material a ser secado. Com isso, o calor é transferido da superfície para o interior do corpo enquanto que a umidade é transportada no sentido contrário, como indica a Figura 5. Por outro lado, na secagem por micro-ondas o calor é produzido dentro da peça como resultado da absorção de uma quantidade de energia de micro-ondas pelas moléculas de água contidas nos poros (Kowalski et al., 2005). Desta forma, na secagem por micro-ondas, a temperatura no interior do objeto é maior que a temperatura na superfície fazendo com que a transferência de calor e massa ocorram no mesmo sentido (Kowalski & Rybicki, 2004), como pode ser observado na Figura 6. Tal coincidência de fluxos aumenta a vazão de umidade e modera a sua distribuição dentro do material (Kowalski & Mielniczuk, 2007). Deste modo, a secagem por micro-ondas apresenta as seguintes vantagens quando comparado com a secagem convectiva:

- Taxas de secagem mais rápidas levando a um tempo de processamento mais curto;
- Menores gradientes de umidade e de temperatura dentro do corpo que implica em menores tensões durante o processo de secagem.
- Produto de melhor qualidade.

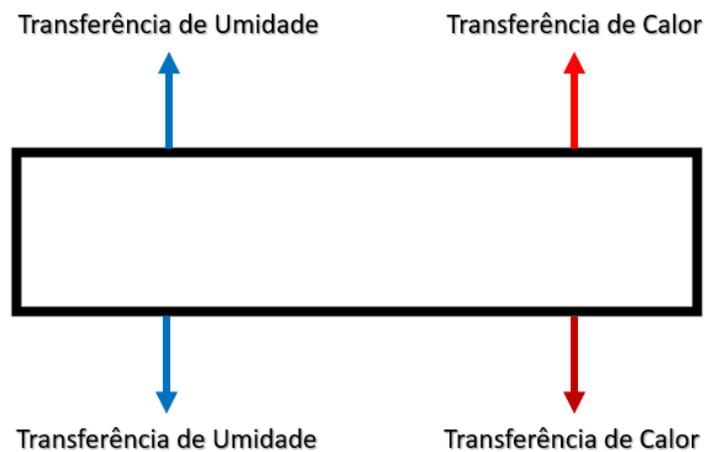
Itaya et al. (2005, 2007) analisaram experimentalmente o efeito do aquecimento interno por micro-ondas no comportamento de secagem de uma placa de argila. Foi observado que qualquer amostra aquecida com potência superior a 200 W foi quebrada quando a temperatura interna alcançou a temperatura de ebulição da água. Quando aplicado uma potência constante de 100 W, em que a temperatura interna não superou 97°C, nenhuma rachadura foi gerada na amostra.

**Figura 5.** Sentidos das transferências de calor e de umidade no corpo para secagem por convecção.



Fonte: Autores (2020).

**Figura 6.** Sentidos das transferências de calor e de umidade no corpo na secagem por micro-ondas.



Fonte: Autores (2020).

Itaya et al. (2001, 2005, 2007) observaram que na secagem por micro-ondas a falha que ocorre nas peças é causada pela expansão proveniente da elevada pressão de vapor interno, enquanto que na secagem convencional, a falha acontece pelas tensões de tração proveniente do encolhimento do produto durante a fase inicial do processo de secagem.

Itaya et al. (2005, 2007) observaram que o comportamento transiente da secagem por micro-ondas foi significativamente diferente da secagem utilizando ar quente. Tanto a

temperatura quanto a taxa de secagem flutuaram de forma complexa durante todo o processo de secagem, sendo considerado pelos autores um fenômeno característico do processo de secagem por micro-ondas.

Itaya et al. (2007) concluíram que uma forma alternativa e eficiente de fazer a secagem por micro-ondas seria controlar a potência da micro-onda, de tal forma que a temperatura interna da peça não atinja a temperatura de ebulição da água. Dessa forma, a secagem acontece de forma mais rápida que aquela obtida aplicando uma potência constante, além de não causar falhas provenientes da elevada pressão de vapor interno na peça. Além disso, estes autores realizaram experimentos controlando a potência de forma dinâmica, como descrito anteriormente, e a secagem foi completada com sucesso, sem formação de rachaduras e com um tempo relativamente curto. O tempo de secagem foi de aproximadamente 37% do tempo necessário para secar o produto por aquecimento convectivo, e equivale a 15% do tempo total utilizando secagem por radiação.

Kowalski et al. (Kowalski & Rybicki, 2004; Kowalski et al., 2004; Kowalski et al., 2005) analisaram a distribuição e evolução temporal da temperatura, do teor de umidade e das tensões induzidas durante os processos de secagem convectiva e secagem por micro-ondas em uma amostra cilíndrica de argila caulim. A análise teórica das tensões induzidas por secagem e das deformações dos materiais a serem secados é baseada nos modelos constitutivos elástico e viscoelástico. O modelo de secagem termomecânica é resolvido numericamente usando os métodos de elementos finitos e de diferenças finitas. Os resultados teóricos são confrontados com os dados experimentais obtidos pelo método de emissão acústica, que permitem monitorar o desenvolvimento das tensões induzidas pela secagem. Os pesquisadores observaram que o calor fornecido volumetricamente na secagem de micro-ondas faz com que os fluxos de calor e umidade fluam na mesma direção, e isso resulta em uma distribuição do teor de umidade mais uniforme quando comparado com a secagem por convecção. Além disso, foi observado que a taxa de secagem é mais rápida quando utilizado micro-ondas e que, na secagem por convecção, há uma maior geração de tensões em toda a peça.

Kowalski et al. (2005) mostraram que o aquecimento volumétrico intensivo do material envolve transições de fase de elevada taxa e aumento significativo da pressão dos poros, causando danos ao material.

Segundo Mihoubi e Bellagi (2009), a geração de calor volumétrico durante o processo de secagem por micro-ondas é função das propriedades do material, da frequência, da intensidade do aquecimento aplicado e da distância entre a fonte e a superfície do produto

Itaya et al. (2005) afirmam que a taxa de penetração de micro-ondas é proporcional a uma exponencial do produto entre o teor de umidade e espessura. Dessa forma, fica claro que a taxa de penetração de micro-ondas tende a diminuir durante o processo de secagem, reduzindo a eficiência do mesmo.

#### **d) Secagem convectiva e por micro-ondas combinadas**

Kowalski e Mielniczuk (2007) estudaram a eficiência da secagem por micro-ondas e por convecção com respeito à taxa de secagem e formação de tensões em uma amostra de argila caulim na forma de uma placa fina. Foi observado que a quantidade de energia absorvida no processo de secagem por micro-ondas diminui ao longo do processo fazendo com que a taxa de secagem fique inferior do que a secagem por convecção para elevados instantes de tempo. Os autores concluíram que a secagem por micro-ondas é altamente eficiente apenas no primeiro período de secagem, em que o teor de umidade é relativamente alto. Por isso, o mesmo sugere o uso do aquecimento por micro-ondas no primeiro período de secagem e, em seguida, continuar o processo utilizando secagem por convecção ou ainda, aplicar imediatamente uma combinação de secagem por convecção e micro-ondas.

Kowalski e Mielniczuk (2007) também examinaram experimentalmente a secagem combinada com micro-ondas e convectiva e descobriram que esta técnica é a mais eficiente tanto na redução de tensões quanto na obtenção de uma maior taxa de secagem. A secagem foi examinada experimentalmente durante todo o processo, utilizando o método de emissão acústica, monitorando a formação de micro- e macro-trincas provenientes das tensões formadas no corpo.

Kowalski et al. (2010) desenvolveram um modelo matemático que descreve a cinética da secagem combinada de micro-ondas e convecção para todo o processo. A influência da deformação do corpo durante o processo de secagem na transferência de calor e massa é negligenciada. Com isso, o modelo é aplicável somente em materiais que deformam muito pouco durante a secagem. Os processos experimentais realizados em uma amostra cilíndrica de argila caulim permitiram estimar os coeficientes do material necessários para resolução do modelo bem como validar o modelo de secagem híbrida proposto. Assim, os pesquisadores concluíram que o modelo matemático pode ser utilizado como base para otimização do processo de secagem. Além disso, os autores mostraram que o teor de umidade em função do tempo de secagem apresenta comportamento complexo que reflete os mecanismos de secagem variáveis em estágios distintos de secagem.

Mihoubi e Bellagi (2009) compararam a formação de tensões em uma amostra de argila provenientes dos processos de secagem por convecção e por combinação de convecção e micro-ondas. Para tal, foi desenvolvido um modelo matemático que descreve a transferência de calor e massa acoplado com as equações de equilíbrio mecânico (tensão e deformação). O modelo foi solucionado numericamente utilizando o método dos elementos finitos. Os autores concluíram que a secagem híbrida é mais eficiente quando comparado com a secagem por convecção pura, tanto na intensidade das tensões quanto na redução do tempo de secagem. Além disso, os pesquisadores variaram parâmetros no modelo híbrido e concluíram que as tensões geradas durante o processo de secagem dependem mais da temperatura do ar de secagem do que da potência do micro-ondas. Variando a temperatura do ar de secagem de 20°C para 50°C mais que dobrou a tensão máxima obtida no processo.

Segundo Kowalski et al. (2005), o principal impedimento da utilização de secagem por micro-ondas em processos industriais deve-se ao elevado custo do equipamento. Sendo assim, tal processo de secagem é comumente empregado em produtos sensíveis e de elevado custo (Kowalski, 2012).

Diante do exposto neste artigo, de forma resumida, tem-se que a otimização de processos de secagens está fundamentada em três aspectos principais (Araújo et al., 2016; Banaszak & Kowalski, 2005; Batista et al., 2009; Kowalski et al., 2010)

- Melhoria da qualidade do produto final;
- Redução do tempo necessário para concluir o processo;
- Redução do custo energético e de impactos ambientais;

Em geral, a otimização da secagem dos produtos cerâmicos era realizada a partir da experiência dos engenheiros e o processo geralmente levava muito tempo, reduzindo a produtividade do processo (Hasatani et al., 1992, 1993). Se as condições operacionais forem alteradas sem controle, de tal forma que seja alcançado maiores taxas de transferência de calor e massa, o tempo de processamento diminuirá, porém poderá produzir defeitos internos no produto (Silva et al., 2016).

Desta forma, com o auxílio do desenvolvimento tecnológico, modelagens matemáticas robustas, bem como resultados experimentais obtidos por pesquisadores, é importante que as empresas realizem modificações nos projetos e nos processos de manufatura visando aumentar a produtividade, e obter um produto de melhor qualidade, para se manterem competitivas no mercado. A obtenção de um produto de melhor qualidade não está

relacionada apenas a sua aparência externa, mas também suas características mecânicas e geométricas, como módulo de elasticidade, tensões residuais, tenacidade, resistência à fratura, e tolerâncias dimensionais.

Neste sentido, a avaliação quantitativa destes parâmetros é essencial para se obter produtos de alta qualidade (Keum et al., 2000). Além disto, é importante que as empresas busquem minimizar o consumo de energia, haja vista que o processo de secagem é responsável por uma elevada parcela do custo energético industrial (Kowalski et al., 2010).

Para alcançar um processo de secagem otimizado, torna-se crucial que os engenheiros analisem os métodos especiais de secagem bem como métodos combinados (híbridos), em que diferentes fontes de energia possam ser utilizadas ao mesmo tempo, para verificar a viabilidade dos mesmos para tal fim.

## **5. Considerações Finais**

Este trabalho apresentou uma revisão de diversos tópicos relacionados com a secagem de materiais cerâmicos. O processo de secagem é uma etapa importante na manufatura de produtos cerâmicos por conferir às peças a resistência necessária durante a etapa de queima. A água, que adicionada a matéria prima (argila) deve ser retirada de forma homogênea para evitar a formação de defeitos durante o processo. Foram apresentados diversos tipos de secagem que podem ser utilizados para remoção da umidade dos materiais, sendo o mais comum, secagem por convecção artificial, que consiste em fornecer a energia térmica necessária passando uma corrente de ar quente pelo material, em estufas ou em câmaras de secagem. Ficou constatado que o processo de secagem faz parte do processo de manufatura de uma série de produtos, além de ser responsável por um elevado consumo energético.

A importância da curva de secagem, na análise do processo, a partir da qual é obtida a taxa de secagem em cada instante de tempo foi evidenciada. Evidenciou-se que, no primeiro estágio de secagem, deve-se ter maior cuidado para evitar a formação de defeitos, pois é nesta etapa que se tem as maiores contrações na peça moldada. Bem como, as regiões com maiores gradientes de umidade e temperatura tendem a formar as maiores tensões, que podem levar a formação de rachaduras na peça, caso supere a tensão de resistência do material. Além disso, foram citados vários defeitos que podem ocorrer durante o processo de secagem, bem como as principais causas e, como a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar secagem, tempo, forma, espessura, relação área/volume, granulação, umidade inicial e propriedades do material influenciam na secagem de materiais cerâmicos.

Foi dada atenção especial aos trabalhos desenvolvidos utilizando métodos especiais de secagem, tais como secagem intermitente, por aquecimento interno, micro-ondas e combinação das mesmas. A partir de modelagens matemáticas apropriadas, otimização do produto, combinação de métodos especiais de secagem e controle efetivo do processo, é possível obter-se produtos de maior qualidade, em menor tempo de processo (aumento de produtividade) e com redução de custo energético.

Tendo em vista a importância do tema, para o mundo, os autores sugerem que novas pesquisas quantitativas relacionadas a secagem de produtos cerâmicos sejam conduzidas com técnicas tradicionais, tais como secadores em batelada e em forno contínuo, e secagens inovadoras como secagem por micro-ondas e infravermelho ou até mesmo a combinação de algumas delas, com vistas a ampliar os conhecimentos sobre este importante processo e seus efeitos na qualidade e custo final do produto.

Finalmente, com este artigo, os autores esperam poder contribuir com um melhor entendimento do processo de secagem de materiais cerâmicos, e fornecer subsídios para engenheiros, especialistas, acadêmicos e industriais, na tomada de decisões significativas, que possam conduzir as empresas do setor ceramista, a um caminho que as tornem mais competitivas nos mercados nacional e internacional.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a FINEP pelo apoio financeiro, e aos pesquisadores referenciados no manuscrito que, com suas pesquisas, contribuiram com a melhoria deste trabalho.

### **Referências**

Almeida, G. S., Fernandes, M. A. F., Fernandes, J. N., Neves, G. A., Barbosa de Lima, W. M. P., & de Lima, A. G. B. (2014). Drying of industrial ceramic bricks: An experimental investigation in oven. *Defect and Diffusion Forum*, 353, 116–120. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.353.116>

Alves, H. J., Melchiades, F. G., & Boschi, A. O. (2008). Consumo de gás natural na indústria de revestimentos cerâmicos brasileira (Consumption of natural gas in Brazilian ceramic tile industry). *Cerâmica*, 54(331), 326–331.

Araújo, M. V., Delgado, J., & Barbosa de Lima, A. G. (2016). On the Use of CFD in Thermal Analysis of Industrial Hollow Ceramic Brick. *Diffusion Foundations*, 10, 70–82. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DF.10.70>

Araújo, M. V., Santos, R. S., da Silva, R. M., & Barbosa de Lima, A. G. (2017). Drying of Industrial Hollow Ceramic Brick: Analysis of the Moisture Content and Temperature Parameters. *Defect and Diffusion Forum*, 380, 72–78. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.380.72>

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)

Banaszak, J., & Kowalski, S. J. (2005). Theoretical and experimental analysis of stresses and fractures in clay like materials during drying. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(4), 497–503. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.06.012>

Barbosa Da Silva, J., Almeida, G. S., Barbosa de Lima, W. C. P., 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, 971–976. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.312-315.971>

Barbosa da Silva, J., Almeida, G. S., Neves, G. A., Barbosa de Lima, W. C. P., de Farias Neto, S. R., & de 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, 267–272. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.267>

Batista, V. R., Nascimento, J. J. S., & Lima, A. G. B. L. (2009). Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. *Matéria, Rio de Janeiro*, 14(4). <https://doi.org/10.1590/S1517-70762009000400002>

Batista, V. R., Nascimento, J. J. S., & Lima, A. G. B. (2008). Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais. *Revista*

*Eletrônica de Materiais e Processos*, 3(1), 46–61.

Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.

Boch, P., & Niepce, J.-C. (2010). *Ceramic Materials: Processes, Properties, and Applications* (Vol. 98). John Wiley & Sons.

Brongniart, A. (1844). *Traité des arts céramiques ou des poteries considérées dans leur histoire, leur pratique et leur théorie* (Vol. 2). Bechet; Mathias.

Brosnan, D. A., & Robinson, G. C. (2003). *Introduction to drying of ceramics: with laboratory exercises*. American Ceramic Society.

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.

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. John Wiley & Sons.

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). *Materials science and engineering* (Vol. 5). John Wiley & Sons NY.

Cengel, Y. A. (2007). *Heat and mass transfer*. Tata McGraw-Hill Education.

Chua, K. J., Mujumdar, A. S., & Chou, S. K. (2003). Intermittent drying of bioproducts—an overview. *Bioresource Technology*, 90(3), 285–295. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00133-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00133-0)

Cihan, A., Kahveci, K., & Hacıhafizoğlu, O. (2007). Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.057>

Clark, D. E., & Sutton, W. H. (1996). Microwave processing of materials. *Annual Review of*

*Materials Science*, 26(1), 299–331.

Comini, G., & Lewis, R. W. (1976). A numerical solution of two-dimensional problems involving heat and mass transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19(12), 1387–1392. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(76\)90067-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(76)90067-3)

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>

de Lima, A. G. B., da Silva, J. B., Almeida, G. S., Nascimento, J. J. S., Tavares, F. V. S., & Silva, V. S. (2016). Clay products convective drying: foundations, modeling and applications. In *Drying and Energy Technologies* (pp. 43–70). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_3)

Defraeye, T. (2014). Advanced computational modelling for drying processes—A review. *Applied Energy*, 131, 323–344. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.027>

Edgar, R. H., & Osepchuk, J. M. (2001). Consumer, commercial, and industrial microwave ovens and heating systems. In *Handbook of Microwave Technology for Food Application* (pp. 215–278). New York, USA: Marcel Dekker.

Etuk, S. E., Akpabio, I. O., & Udoh, E. M. (2003). Comparison of the thermal properties of clay samples as potential walling material for naturally cooled building design. *Journal of Environmental Sciences*, 15(1), 65–68.

Ford, R. W. (2013). *Ceramics drying*. Oxford, England: Elsevier.

Fortes, M., & Okos, M. R. (1980). Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. *Advances in Drying*, 1, 119–154.

Hasatani, M., Itaya, Y., & Hayakawa, K. (1992). -Viscoelastic Strain-Stress and Heat/Moisture Transfer. *Drying Technology*, 10(4), 1013–1036.

<https://doi.org/10.1080/07373939208916493>

Hasatani, M., Itaya, Y., Muroie, K., & Taniguchi, S. (1993). Contraction characteristics of molded ceramics during drying. *Drying Technology*, 11(4), 815–830.

<https://doi.org/10.1080/07373939308916865>

Itaya, Y., Mabuchi, S., & Hasatani, M. (1995). Deformation behavior of ceramic slabs by nonuniform drying. *Drying Technology*, 13(3), 801–819.

<https://doi.org/10.1080/07373939508916984>

Itaya, Y., Mori, S., & Hasatani, M. (1999). Effect of intermittent heating on drying-induced strain-stress of molded clay. *Drying Technology*, 17(7–8), 1261–1271.

<https://doi.org/10.1080/07373939908917613>

Itaya, Y., Okouchi, K., & Mori, S. (2001). Effect of heating modes on internal strain–stress formation during drying of molded ceramics. *Drying Technology*, 19(7), 1491–1504.

<https://doi.org/10.1081/DRT-100105302>

Itaya, Y., Taniguchi, S., & Hasatani, M. (1997). A numerical study of transient deformation and stress behavior of a clay slab during drying. *Drying Technology*, 15(1), 1–21.

<https://doi.org/10.1080/07373939708917216>

Itaya, Y., Uchiyama, S., Hatano, S., & Mori, S. (2005). Drying enhancement of clay slab by microwave heating. *Drying Technology*, 23(6), 1243–1255. <https://doi.org/10.1081/DRT-200059487>

Itaya, Y., Uchiyama, S., & Mori, S. (2007). Internal heating effect and enhancement of drying of ceramics by microwave heating with dynamic control. *Transport in Porous Media*, 66(1–2), 29–42. <https://doi.org/10.1007/s11242-006-9020-4>

Kawaguti, W. M. (2005). *Estudo do comportamento térmico de um fornos intermitentes tipo paulistinha utilizados na indústria de cerâmica vermelha* (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina). Obtido em <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101786>

Ketelaars, A. A. J., Jomaa, W., Piggali, J. R., & Coumans, W. J. (1992). Drying shrinkage and stresses. *8th International Drying Symposium (IDS'92), August 2-5, 1992, Montreal, Quebec, Canada*. Elsevier.

Keum, Y. T., Jeong, J. H., & Auh, K. H. (2000). Finite-element simulation of ceramic drying processes. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 8(4), 541.

Khalili, K., Bagherian, M., & Khisheh, S. (2014). Numerical simulation of drying ceramic using finite element and machine vision. *Procedia Technology*, 12, 388–393. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.504>

Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to ceramics* (Vol. 183). Wiley New York.

Kowalski, S. J., & Pawłowski, A. (2011). Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(4), 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.02.012>

Kowalski, S. J., & Rybicki, A. (2004). Qualitative aspects of convective and microwave drying of saturated porous materials. *Drying Technology*, 22(5), 1173–1189. <https://doi.org/10.1081/DRT-120038586>

Kowalski, S. J., Musielak, G., & Banaszak, J. (2010). Heat and mass transfer during microwave-convective drying. *AIChE Journal*, 56(1), 24–35. <https://doi.org/10.1002/aic.11948>

Kowalski, S. J., Rajewska, K., & Rybicki, A. (2004). Mechanical effects in saturated capillary-porous materials during convective and microwave drying. *Drying Technology*, 22(10), 2291–2308. <https://doi.org/10.1081/DRT-200040004>

Kowalski, S. J., Rajewska, K., & Rybicki, A. (2005). Stresses generated during convective and microwave drying. *Drying Technology*, 23(9–11), 1875–1893. <https://doi.org/10.1080/07373930500210226>

Kowalski, S. J. (2012). *Thermomechanics of drying processes* (Vol. 8). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-36405-4>

Kowalski, S. J., & Mielniczuk, B. (2007). Analysis of effectiveness and stress development during convective and microwave drying. *Drying Technology*, 26(1), 64–77. <https://doi.org/10.1080/07373930701781637>

Kumar, C., Karim, M. A., & Joardder, M. U. H. (2014). Intermittent drying of food products: A critical review. *Journal of Food Engineering*, 121, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014>

Itaya, Y., & Hasatani, M. (1996). R & D Needs-Drying of Ceramics. *Drying Technology*, 14(6), 1301–1313. <https://doi.org/10.1080/07373939608917147>

Margueron, J. (2003). *Les mésopotamiens*. Editions A&J Picard.

Mihoubi, D., & Bellagi, A. (2009). Drying-induced stresses during convective and combined microwave and convective drying of saturated porous media. *Drying Technology*, 27(7–8), 851–856. <https://doi.org/10.1080/07373930902988122>

Mihoubi, D., Zagrouba, F., Vaxelaire, J., Bellagi, A., & Roques, M. (2004). Transfer phenomena during the drying of a shrinkable product: modeling and simulation. *Drying Technology*, 22(1–2), 91–109. <https://doi.org/10.1081/DRT-120028216>

Osepchuk, J. M. (2002). Microwave power applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 975–985. <https://doi.org/10.1109/22.989980>

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

Reed, J. S. (1995). *Principles of ceramics processing*. New York, USA: John Wiley & Sons,

Inc.

Santos, G. M. (2001). *Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha.*

Shiraki, Y. (1955a). Studies on Clay–Water System.(II-1) Plasticity of Clay. *Journal of the Ceramic Association of Japan*, 63(709), 233–243.

Shiraki, Y. (1955b). Studies on Clay–Water System.(II-3) Theoretical Consideration to the Visco-Elastic Property of Clay–Water Masses. *Journal of the Ceramic Association of Japan*, 63(712), 421–429.

Shiraki, Y., & Fukuura, Y. (1955). Studies on Clay–Water System.(II-4) Plastic Deformation of Nearly Dry Clay, and Relations between Water Content and Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity. *Journal of the Ceramic Association of Japan*, 63(714), 527–532.

Shiraki, Y., & Komaki, T. (1955). Studies on Clay–Water System.(I-12) Visco-Elastic Properties of Clay Paste. *Journal of the Ceramic Association of Japan*, 63(708), 194–197.

Silva, V. S., Delgado, J., 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DF.7.30>

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)

Teixeira de Brito, M. K., Teixeira de Almeida, D. B., Barbosa de Lima, A. G., Almeida Rocha, L., Santana de Lima, E., & Barbosa de Oliveira, V. A. (2016). Heat and Mass Transfer during Drying of Clay Ceramic Materials: A Three-Dimensional Analytical Study. *Diffusion Foundations*, 10, 93–106. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DF.10.93>

Van der Zanden, A. J. J., Schoenmakers, A. M. E., & Kerkhof, P. (1996a). Isothermal vapour and liquid transport inside clay during drying. *Drying Technology*, 14(3–4), 647–676.

<https://doi.org/10.1080/07373939608917119>

Van Der Zanden, A. J. J., Turner, I., & Mujumdar, A. S. (1996b). Modelling and simulating simultaneous liquid and vapour transport in partially saturated porous materials. *Mathematical Modelling and Numerical Techniques in Drying Technology/Eds. Turner & Mujumdar*, 157–177.

Vandiver, P. B. (1990). Venuses and wolverines: the origins of ceramic technology, ca. 26 000 B. P. *Ceramics and Civilization*, 5 Pp., 13.

Zagrouba, F., Mihoubi, D., & Bellagi, A. (2002). Drying of clay. II Rheological modelisation and simulation of physical phenomena. *Drying Technology*, 20(10), 1895–1917.  
<https://doi.org/10.1081/DRT-120015575>

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

Ricardo Soares Gomez – 40%

Hortência Luma Fernandes Magalhães – 5%

Túlio Rafael Nascimento Porto – 5%

Elisiane Santana de Lima – 5%

Renato Alexandre Costa de Santana – 15%

Kelly Cristiane Gomes – 10%

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima – 15%