



ESTUDO DE VIABILIDADE E DESENVOLVIMENTO DE FORNO MICRO-ONDAS PARA SINTERIZAÇÃO DE CERÂMICAS AVANÇADAS

Apresentado no
10º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP
27 e 28 de novembro de 2019 - Sorocaba-SP, Brasil

MATHEUS DA NÓBREGA¹, HUYRA ESTEVÃO DE ARAÚJO²

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, IFSP, Câmpus Piracicaba, matheus.nobrega@aluno.ifsp.edu.br.

² Professor Doutor, IFSP, Câmpus Piracicaba, huyraestevao@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.05.02-0 Cerâmicos

RESUMO: O uso de micro-ondas no processamento e obtenção de materiais tem crescido consideravelmente nos últimos anos. Neste aspecto, dispositivos projetados especialmente para esse fim têm se mostrado de grande interesse tanto para a comunidade científica como para a indústria, dado uma série de novas aplicações, acessibilidade e baixo custo. Sob essa perspectiva, o presente estudo tem por meta funcional a viabilização e desenvolvimento de um método capaz de realizar a sinterização de peças cerâmicas através de ondas eletromagnéticas em um forno micro-ondas. Na sinterização de materiais cerâmicos, a utilização de micro-ondas permite redução de tempo de processamento, economia de energia e melhora na uniformidade microestrutural das estruturas cerâmicas. Caracterizando-se como um estudo descritivo e exploratório, essa pesquisa foi elaborada fundamentando-se na problemática acerca dos processos convencionais de conformação de estruturas cerâmicas, onde estes apresentam diversas imperfeições e imprecisões nos modelos fabricados. Sob essa ótica a sinterização de cerâmicas avançadas através de micro-ondas surge como método viável e prático na substituição dos processos tradicionais de sinterização de estruturas cerâmicas.

PALAVRAS-CHAVE: cerâmicas; dispositivos; processamento; sinterização.

FEASIBILITY STUDY AND DEVELOPMENT OF MICROWAVE OVEN FOR SINTERITION OF ADVANCED CERAMICS

ABSTRACT: The use of microwaves in processing and obtaining materials has grown considerably in recent years. In this regard, devices designed especially for this purpose have been of great interest to both the scientific community and industry, given a number of new applications, accessibility and low cost. From this perspective, the present study has the functional goal of enabling and developing a method capable of sintering ceramic tiles through electromagnetic waves in a microwave oven. In the sintering of ceramic materials, the use of microwaves allows for reduced processing time, energy savings and improved microstructural uniformity of ceramic structures. Being characterized as a descriptive and exploratory study, this research was elaborated based on the problematic about the conventional processes of shaping of ceramic structures, where they present several imperfections and inaccuracies in the manufactured models. From this point of view, the sintering of advanced ceramics by microwave emerges as a viable and practical method to replace the traditional sintering processes of ceramic structures.

KEYWORDS: ceramics; devices; processing; sintering.

INTRODUÇÃO

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas limitadas a uma faixa espectral que se estende de 0,3 a 300 GHz, com o corresponde intervalo de comprimento de onda de 1m a 1mm. Dada extensa faixa, confere-se a esses formatos de onda, grande potencial de versatilidade em suas aplicações. A energia de micro-ondas é usada a mais de cinco décadas no processamento de materiais, entretanto, no campo das ciências, sua aplicação se deu somente a partir da década de 70 para preparação de amostras e atividades laboratoriais (KEYSON et al., 2006; MENEZES; SOUTO; KIMINAMI, 2007).

Nesse cenário, o processamento de cerâmicas através de micro-ondas ocupa lugar de destaque, podendo ser usado para síntese, secagem, sinterização e eliminação de orgânicos. A sinterização pode ser definida como um tratamento térmico para unir partículas em uma determinada estrutura. Isso ocorre em virtude de uma série de benefícios do uso dessa energia na fabricação de amostras cerâmicas, como redução do consumo de energia e tempo de processamento, tempo de irradiação muito curto, distribuição invertida do perfil de temperatura e aquecimento seletivo. Ressalta-se que essas vantagens ocorrem quando há um extremo controle de todos os pontos do processo de sinterização de estruturas cerâmicas. Em comparação com os processamentos térmicos convencionais, que aquecem inicialmente a superfície do material, a energia de micro-ondas é transformada em calor diretamente dentro do material, por meio da interação entre as moléculas e átomos do material com o campo eletromagnético produzido. (MENEZES; SOUTO; KIMINAMI, 2007; LERICHE et al., 2015)

Nesse aspecto, a utilização de ondas eletromagnéticas através de um forno de micro-ondas mostra-se como um método preciso, viável e não implexo para sinterização de estruturas cerâmicas.

MATERIAL E MÉTODOS

No decorrer deste estudo, foram realizadas diversas análises acerca da viabilidade do uso de um forno micro-ondas no contexto de conformação de peças cerâmicas. Nessa ótica destaca-se que a maioria das aplicações da energia de micro-ondas são direcionadas para processos que utilizam temperaturas relativamente baixas, como nas áreas de alimentos, madeira, borracha e secagem de cerâmicas, há atualmente, um crescente interesse do uso dessa energia no processamento de materiais cerâmicos em altas temperaturas, acima de 1500 °C, em virtude das vantagens potenciais de aplicação dessa tecnologia.

KEYSON et al. (2006) desenvolveram um estudo analisando a conformação de materiais através de um forno micro-ondas convencional adaptado que contém uma célula rádio susceptível inserida em seu interior, um controlador de temperatura externo e equipado com a célula micro-ondas, deste modo, o dispositivo tem sido usado com sucesso na síntese de óxidos metálicos e no tratamento de outros materiais, em especial na sinterização e ordenamento de redes cristalinas de filmes finos. A Figura 1 demonstra o esquema de funcionamento e a configuração funcional do dispositivo desenvolvido.

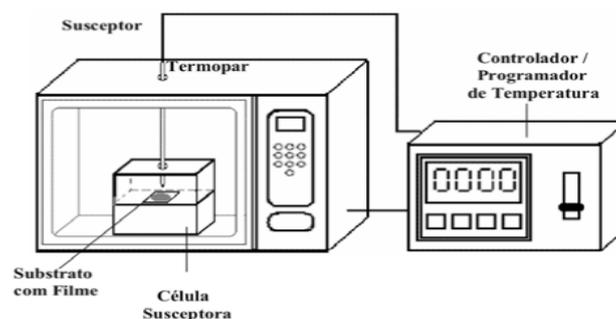


FIGURA 1. Configuração do forno micro-ondas doméstico modificado (KEYSON et al., 2006)

Para o desenvolvimento de forno micro-ondas específico para esse contexto, é necessário atentar-se aos requisitos particulares da sinterização de cerâmicas nesse método. Tais requisitos incluem as elevadas temperaturas de operação, altas taxas de aquecimento e uniformidade de temperatura em toda a amostra. Com o objetivo de evitar esses problemas fundamentais associados a instabilidade térmica, também chamado de efeito “*thermal runaway*”, o superaquecimento volumétrico da amostra, que pode levar à heterogeneidade severa de temperatura e a pequena taxa de absorção de micro-ondas de cerâmicas em baixas temperaturas, devem ser devidamente controlados para que todo o processamento cerâmico seja efetuado de maneira precisa e com alto grau de qualidade.

LERICHE et al. (2015) realizaram um estudo exploratório comparando a sinterização de biocerâmicas nos métodos convencionais com a sinterização através de micro-ondas, para realizar a conformação de estruturas de hidroxiapatita (HA), com o objetivo de melhorar das suas propriedades mecânicas. Nesse contexto, as micro-ondas, apresentaram-se como método promissor devido a curta duração do tratamento térmico. Segundo THUAULT et al. (2014), os cristais de HA são formados por fosfato de cálcio cristalino e representam mais de 80% do fósforo e quase toda a porcentagem de cálcio no corpo humano, desde modo, a HA possui uma vasta aplicação em processos cirúrgicos e para reparar

partes danificadas do corpo humano. Em contrapartida, devido suas fracas propriedades mecânicas, sua aplicação é limitada. Sendo assim, há diversos estudos na comunidade científica com o intuito de utilizar com maior viabilidade e aplicabilidade a HA, nesse cenário a conformação desse composto através de um forno micro-ondas surge como método significativo para limitar o crescimento de grãos durante o processo de sinterização. O processamento por micro-ondas, graças as suas características específicas, como altas taxas de aquecimento e tempo de irradiação curto, possibilita a fabricação de amostras densas com grãos finos. A presença de um susceptor junto do forno micro-ondas, como ocorre nos métodos convencionais de conformação de estruturas cerâmicas, promove a redução de suas vantagens, uma vez que rastreia em grande parte os campos de micro-ondas.

Prosseguindo em relação a análise comparativa entre os métodos convencionais com o processo de cerâmicas através de micro-ondas com base nos estudos de MENEZES; SOUTO; KIMINAMI (2007) e LERICHE et al. (2015), reitera-se que no processamento térmico convencional, ocorre, inicialmente, o aquecimento superficial do material e só em seguida a energia térmica é transferida para o interior da estrutura cerâmica, por meio de processos de convecção e condução, ou seja, a densidade aumenta lentamente com a temperatura para atingir cerca de 97,9% de compactação a 1250°C. Em contrapartida, a energia de micro-ondas é transformada em calor diretamente no interior do material através da interação dos átomos do material cerâmico com o campo eletromagnético gerado dentro do forno micro-ondas, fazendo com que a densidade aumente com a temperatura de sinterização até 1230°C e diminui acima dessa temperatura, o que possibilita o aquecimento interno e volumétrico do material, promovendo desse modo a formação de gradientes de temperaturas e fluxos de calor invertidos, promovendo níveis de densidade próximos a 99,6%. As cerâmicas, bem como as que estão em análise nesse estudo, são em geral transparentes às ondas eletromagnéticas geradas pelo forno micro-ondas, entretanto, quando aquecidas acima de sua temperatura crítica, passam a absorver mais eficientemente a radiação de micro-ondas, devido a isso é necessário o efetivo controle do nível térmico no dispositivo desenvolvido. As características apresentadas pelo uso do forno micro-ondas possibilitam o aquecimento de peças grandes de maneira rápida e uniforme, sem que haja a geração de elevadas tensões térmicas que podem causar imperfeições nas peças desenvolvidas, como trincas e rachaduras.

O esquema funcional do forno micro-ondas para sinterização de estrutura cerâmica, objetivo do estudo, pode ser visto na Figura 2. Onde MW representa as ondas eletromagnéticas oriundas no micro-ondas e Rn representa a resistência para as linhas da onda eletromagnética, r denota a resistência às perdas de modelagem na amostra. A frequência inicial é determinada pela fonte de tensão (V) utilizada, uma vez que para o funcionamento ideal do dispositivo, é necessário abaixar a tensão com o transformador abaixador. O capacitor (C) em série com o indutor (L) operará como cavidade ressonante para o circuito elétrico desenvolvido, operando para impedir que haja oscilações na temperatura juntamente com o termômetro (ir) junto do circuito, para controle de temperatura, bem como promover o melhor ajuste da operação. O diagrama de blocos abaixo simplifica a aplicação do forno micro-ondas (Figura 3). Tais diagramas serão desenvolvidos por meio da elaboração de protótipos com os componentes eletrônicos necessários para o seu funcionamento, de mesmo modo que será realizado simulações com *softwares* específicos para avaliar e observar parâmetros associados ao funcionamento do circuito do forno micro-ondas.

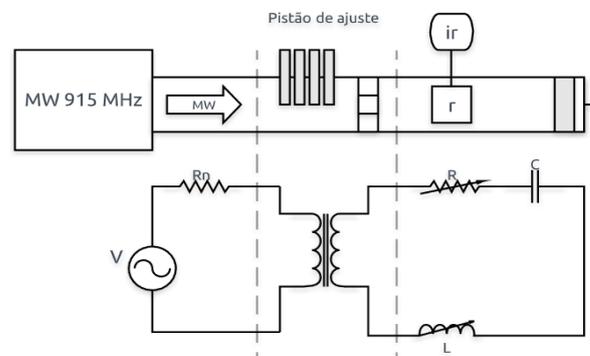


FIGURA 2. Esquema elétrico do funcionamento do micro-ondas.

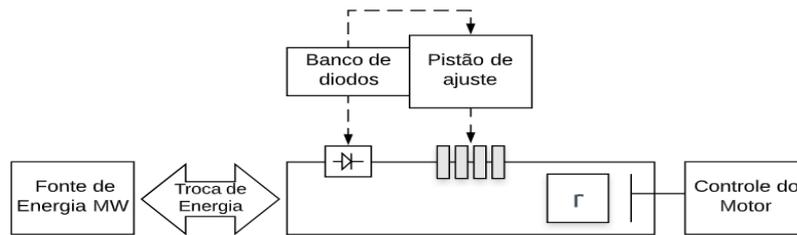


FIGURA 3. Diagrama de blocos simplificado para operação funcional do microondas

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi observado, por meio da revisão bibliográfica, que a sinterização rápida, apesar de conduzir a elevadas densificações em um curto período de tempo, se depara com obstáculos que limitam a sua utilização, como o desenvolvimento de tensões térmicas no modelo, resultantes de gradientes de temperatura presentes no processo de sinterização, o que pode produzir a formação de trincas, rachaduras e deterioração das propriedades mecânicas do material, bem como o crescimento irregular dos grãos ao longo da peça, gerando heterogeneidade microestrutural. Sendo assim o processamento de peças cerâmicas através de micro-ondas é uma forma de processamento que, em virtude de suas características destacadas nesse estudo, possibilita ultrapassar as limitações oriundas dos métodos convencionais de sinterização, isso ocorre devido ao fato de que os mecanismo de geração de calor envolvidos no processo através de micro-ondas, permite um aquecimento volumétrico da peça de forma rápida e mais uniforme que no caso da sinterização tradicional. Além disso, a sinterização por micro-ondas promove a intensificação das taxas de densificação, também chamado de “*microwave effect*” provocado pelo campo eletromagnético gerado, diferenciando-se ainda mais dos meios convencionais que não promovem nenhum tipo de aceleração no processo e como característica do processamento cerâmico por micro-ondas, é notável observar que menores tempos de processamento e temperaturas submetidas, refletem na redução dos custos energéticos do processo (Tabela 1) contribuindo de modo consequente a uma considerável economia financeira.

TABELA 1. Comparativo do gasto energético entre o método convencionai e o aquecimento por micro-ondas.

Processo	Gasto Energético (kWh · kg ⁻¹)	Temperatura (°C)
Alumina		
Sinterização Rápida	59	1600
Convencional		
Aquecimento por Micro-ondas	4	1600
Nitreto de Silício		
Processo Convencional	20	N/A
Aquecimento por Micro-ondas	3	N/A

Os estudos de KEYSON et al., (2006) demonstraram com efetividade o uso de um micro-ondas doméstico adaptado na sinterização de diversos materiais, onde foi possível realizar um controle da temperatura bem como a eliminação de material orgânico nos materiais conformados. Em relação ao forno micro-ondas convencional, que aquece até 250°C durante o cozimento de alimentos, com esse novo método, pode-se alcançar temperaturas de até 1400°C com o susceptor (dispositivo que tem a capacidade de absorver energia eletromagnética e convertê-la em calor) apresentando rapidamente um rubro intenso.

Os resultados dos estudos de LERICHE et al., (2015) denotam a viabilidade do processamento de cerâmicas através de micro-ondas, uma vez que a densificação estrutura cerâmica da peça conformada, apresentou considerável desempenho e qualidade, no que pode ser visto na Figura 4. As estruturas avaliadas nesse estudo através da utilização de um forno micro-ondas realizando a sinterização direta, apresentaram que 99% das amostras densas com microestruturas subatômicas foram obtidas em menos de 15 minutos de irradiação e apresentaram propriedades mecânicas consideráveis

como o módulo de *Young* mais alto (>140 GPa) e dureza mais alta (> 9 GPa) em relação a peças conformadas com outros métodos de sinterização.

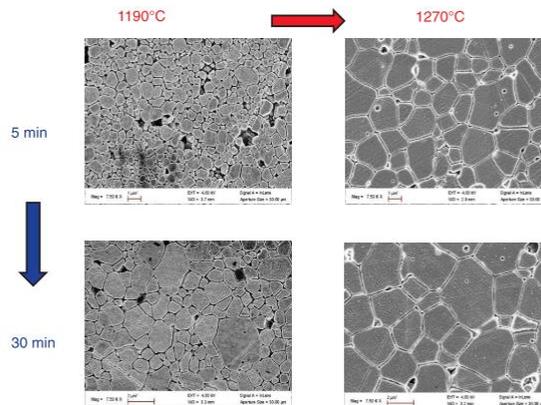


FIGURA 4. Exemplos da sinterização de HA por micro-ondas (LERICHE et al., 2015).

CONCLUSÕES

A base bibliográfica utilizada, mostrou-se de substancial valor para o estudo da viabilidade e desenvolvimento de um forno micro-ondas para sinterização de estruturas cerâmicas avançadas. No contexto funcional a aplicabilidade do forno micro-ondas pode ser vista sob a ótica da comparação realizada pelos estudos apresentados, onde evidenciou-se maior precisão e qualidade nos modelos conformados através do processamento por micro-ondas. De igual forma, o conjunto de novos resultados obtidos promovem o desenvolvimento de um novo modelo de sinterização de estruturas cerâmicas com o intuito de substituição dos tratamentos convencionais que por vezes apresentam imperfeições e imprecisões nas peças cerâmicas fabricadas.

Sob a ótica da conformação por micro-ondas, a sinterização por meio de ondas eletromagnéticas mostra-se de relevante importância tanto no cenário científico como industrial, uma vez que novos métodos de tratamento de peças cerâmicas podem ser desenvolvidos com base no presente estudo, possibilitando um maior desenvolvimento científico na área de materiais. Destaca-se também que o processamento por micro-ondas, oferece considerável economia energética, o que possibilita uma maior economia por parte da indústria durante os procedimentos fabris.

Sendo assim, os resultados obtidos denotam a importância do processo de sinterização por micro-ondas, uma vez que a interação micro-ondas/material, faz com que seja viável a aplicação nesse contexto. Ressalta-se que estudo servirá de subsídio para que o desenvolvimento de um forno micro-ondas para sinterização de estruturas cerâmicas seja desenvolvido.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador e aos colaboradores que contribuíram para o desenvolvimento desse projeto.

REFERÊNCIAS

- KEYSON, D.; LONGO, E.; VASCONCELOS J.; VARELA, J.; ÉBER, S.; DERMADEROSIAN, A. Síntese e processamento de cerâmicas em forno de microondas doméstico. *Cerâmica*, v. 52, p. 50-56, 2006
- LERICHE A.; SAVARY, E.; THUALT, A.; HORNEZ, J.C.; DESCAMPS, M.; MARINEL, S. Comparison of Conventional and Microwave Sintering of Bioceramics. *Adv. Process, Manuf. Technol. Nanostructured Multifunct Mater*, p. 23-32, 2015
- MENEZES, R.R.; SOUTO P.M.; KIMINAMI, R.H.G.A. Microwave sintering of ceramics. Part I: Fundamental aspects. *Cerâmica*, v. 53, n. 325, p. 1-10, 2007.
- THUALT, A. SAVARY E.; HORNEZ, J.; MOREAU, G.; DESCAMPS, M.; MARINEL, S.; LERICHE, A. Improvement of the hydroxyapatite mechanical properties by direct microwave sintering in single mode cavity. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.12.035>>