

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: SINTERIZAÇÃO ALTERNATIVA DE CERÂMICAS AVANÇADAS**

HUYRÁ ESTEVÃO DE ARAUJO<sup>1</sup>, ISABELLA SEGREDO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Docente Huyrá Estevão de Araujo, orientador do grupo de pesquisa ceramicando, IFSP, Câmpus Piracicaba, huyraestevao@ifsp.edu.br.

<sup>2</sup> Graduando Isabella Segredo, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Piracicaba, isabella.segredo@aluno.ifsp.edu.br.

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

**RESUMO:** A prática de sinterização é essencial para o processamento de materiais, entretanto os métodos convencionais consomem muita energia, tornando o processo caro. A sinterização alternativa consiste em técnicas que visam otimizar o processo, além de possibilitar o uso de outras propriedades presentes nas cerâmicas avançadas. Foi analisada a bibliografia qualitativamente de três métodos: sinterização por microondas, cold-sintering e sinterização por plasma, e foi possível concluir que cada método possui vantagens em aplicações específicas ou gerais, e propõe particularidades a serem exploradas. Cada metodologia possui uma característica que destaca-se em seus resultados, na sinterização por microondas a principal característica é a homogeneidade do aquecimento e o curto tempo necessário, na técnica cold-sintering é a baixa temperatura e tempo e a capacidade de sinterizar dispositivos compostos por diversos materiais dielétricos, por fim a sinterização por plasma que possui um rápido aquecimento, e alta capacidade de sinterização de cerâmicas nanocristalinas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sinterização; Microondas; Plasma; Cold-sintering; Sinterização alternativa.

### **REVIEW:ALTERNATIVE SINTERING OF ADVANCED CERAMICS**

**ABSTRACT:** The practice of sintering is essential for the processing of materials, although conventional methods consume a lot of energy, making the process expensive. Alternative sintering consists of techniques that aim to optimize the process, in addition to enabling the use of other properties in advanced ceramics. The bibliography of three methods was qualitatively analyzed: microwave sintering, cold-sintering, and plasma sintering, and it was possible to conclude that each method has advantages in specific or general applications, and proposed particularities to explore. Each methodology has a characteristic that stands out in its results, in the microwave sintering the principal characteristic is the homogeneity of the heating and the short time required, already on the cold sintering technique it is the low temperature and time and the ability to sinter devices composites made of different dielectric materials, finally, the plasma sintering which has rapid heating, and high sintering capacity of nanocrystalline ceramics.

**KEYWORDS:** Sintering; Microwave; Plasma; Cold-sintering; Alternative sintering.

### **INTRODUÇÃO**

A sinterização é uma prática utilizada desde a antiguidade, sendo um processo imprescindível para a conformação de corpos cerâmicos, no qual o processo consiste em um tratamento térmico, cujo intuito é unir partículas em uma estrutura predominantemente sólida, através de processos de transporte de massa, que ocorrem em escala atômica, que podem conduzir, ou não, à densificação do corpo, este processo de transporte de massa é chamado de difusão [2,11]. A importância de técnicas alternativas para a execução deste processo ocorre devido à possibilidade de redução do consumo de energia, tempo e temperatura do processo para indústrias e laboratórios, além de modificar os mecanismos de

densificação que acarretam melhorias na microestrutura e propriedades mecânicas dos materiais [10,5]. Os principais parâmetros analisados na sinterização são: temperatura, tamanho da partícula, densidade, área de superfície, condutividade entre outros [2].

A necessidade de encontrar novas técnicas para a sinterização originou-se do avanço tecnológico, onde torna-se essencial o aprimoramento de técnicas com a finalidade de reduzir custos, tempo de fabricação e aprimorar o processo, possibilitando o aperfeiçoamento de estruturas e seu uso em demais aplicações [1].

Posto isto, esta revisão bibliográfica tem como finalidade explorar métodos recentes e expor seus resultados qualitativos discorrendo sobre vantagens, desvantagens e aplicações encontradas na bibliografia dos respectivos métodos, sendo assim as técnicas recentes que podem ser destacados são: sinterização por microondas, cold-sintering e sinterização por plasma [12].

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Os métodos apresentados serão referentes aos materiais e práticas utilizadas em técnicas de sinterização alternativas.

### **Sinterização por Microondas:**

A técnica de sinterização via microondas apresenta um aquecimento gerado através da absorção das microondas pelo material, onde as microondas absorvidas transformam-se em calor [12]. A temperatura utilizada neste processo pode ser elevada de acordo com o processamento e característica da amostra, podendo ser maiores que 1200° C [1]. Devido ao fenômeno “thermal runaway” que caso não controlado pode gerar pontos de superaquecimento, gerando heterogeneidades no resultado final da amostra, para o controle deste fenômeno que produz características indesejadas na amostra é necessário um aquecimento híbrido, que consiste em aquecer a amostra em uma temperatura convencional até atingir o ponto crítico, após isso a amostra é exposta a altas temperaturas[6]. É importante salientar que para uma melhor eficiência no processo é relevante o uso do susceptor, que é um material cerâmico cujo intuito é uniformizar o aquecimento do material a ser sinterizado, possibilitando um resultado mais uniforme na amostra [6].

Durante o processo de sinterização, o aquecimento decorre de três mecanismos de transferência: condução, convecção e radiação. A condução é resultante da difusão do calor entre as superfícies em contato, enquanto a convecção é responsável pela transferência do calor que ocorre devido ao fluxo de gás no forno para a amostra. Por fim, a radiação térmica é emitida através da elevada temperatura dos elementos presentes no forno que é convertida em energia eletromagnética que é transferida para a atmosfera do forno [12].

### **Cold-sintering:**

Cold-sintering é uma técnica de sinterização que utiliza o mecanismo de solução de pressão e temperatura, sendo caracterizado por uma pressão uniaxial ou isostática de uma mistura entre um pó e solvente na presença de temperaturas baixas, sendo abaixo dos 400°C [14,8]. Esta combinação entre pressão e temperatura, ocorre devido ao fato de que a temperatura em conjunto com a pressão são responsáveis por um intenso transporte de material, promovendo uma deformação plástica e o deslizamento de partículas [12]. A aplicação desta técnica para cada amostra possui protocolos a serem seguidos [8]. O processo consiste em uma mistura manual ou automática entre o pó e o líquido transiente, em seguida a mistura é colocada em uma matriz de aço inoxidável e prensada uniaxialmente ou isostaticamente a temperatura ambiente, primordialmente para o rearranjo das partículas, e após isso há o aumento da temperatura, sendo reajustada automaticamente ou manualmente a pressão aplicada e a temperatura para evitar a retração do corpo, e permitir a sua densificação [8]. É importante salientar que os métodos de pressão isostática e uniaxial diferem entre si em determinados aspectos e resultados.

Há diversas abordagens desta técnica com modificações para cerâmicas específicas, cujo intuito experimental é obter resultados diferentes modificando parâmetros do processamento. Esta técnica possibilita que a amostra A submetida ao processo conserve suas propriedades físico-químicas, ou torne-se um material B com uma composição química diferente, através de uma fase de transição. Uma outra alternativa experimental é a mistura entre duas amostras submetidas ao método que juntam-se formando um novo componente [8].

### **Sinterização por plasma:**

De acordo com Silva e Júnior (1998) a sinterização por plasma consiste em expor a amostra a um plasma inerte ou reativo, cujo aquecimento ocorre por bombardeio dos íons do plasma sobre a superfície

da amostra em contato ou por radiação, caso a amostra esteja isolada [12]. Este método utiliza uma pressão uniaxial, com um pó prensado em um molde grafite, onde possui pulsos de voltagem com altas correntes que são aplicadas diretamente em ambos. O aquecimento ocorre pela descarga de partículas e pela corrente através do molde de grafite, ocorrendo um fenômeno de auto-aquecimento devido as descargas que ativam as superfícies das partículas [13,4]. Esta metodologia é conhecida como spark plasma sintering. A figura 1 abaixo ilustra como o pulso de tensão alternada gerado pela corrente produzida através plasma pode gerar, conforme observado por TROMBINI ET AL. uma pressão de impacto, um aquecimento Joule e uma difusão por campo elétrico na partícula em pó [13].

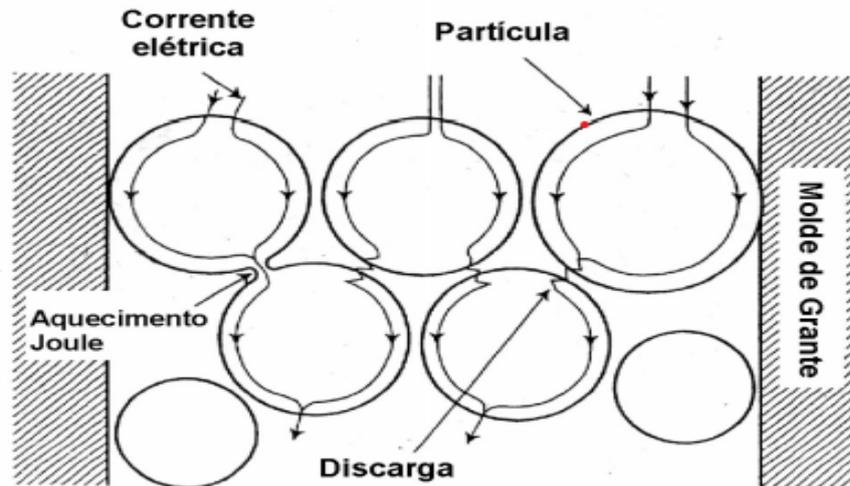


FIGURA 1. Fluxo dos pulsos de corrente através das partículas do pó [13].

Outro método de sinterização utilizando plasma, e que por sua vez possui uma outra metodologia é air-plasma-sprayed thermal barrier coating system (APS TBC), que consiste em um sistema de revestimento por barreira térmica, cujo intuito é isolar e proteger os componentes de turbinas a gás, sendo composto por três camadas, o revestimento superior de cerâmica, revestimento de ligação metálica e substrato de liga. A sinterização nesta técnica ocorre quando a camada superior de cerâmica se degrada em elevadas temperaturas. O método também utiliza a técnica de pulverização de plasma com o intuito de tornar a microestrutura da amostra lamelar [5]. Este último método diferente em muitos pontos da primeira metodologia apresentada, embora utilize o mesmo princípio do plasma. A metodologia em destaque será a metodologia por spark plasma, devido a suas aplicações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Menezes et al. (2007) o processo de sinterização promove mudanças relevantes na microestrutura da amostra, além de outras propriedades. Na técnica de sinterização por microondas, como o processo é homogêneo o resultado é normalmente um corpo uniforme, devido as cerâmicas serem transparentes as microondas como pode ser observado na figura 2, que faz o comparativo entre os métodos de aquecimento, onde no aquecimento convencional o aquecimento é de fora para dentro, acarretando em heterogeneidades no interior amostra, enquanto no aquecimento via microondas o aquecimento ocorre por absorção volumétrica das microondas que propicia um aquecimento homogêneo [6].

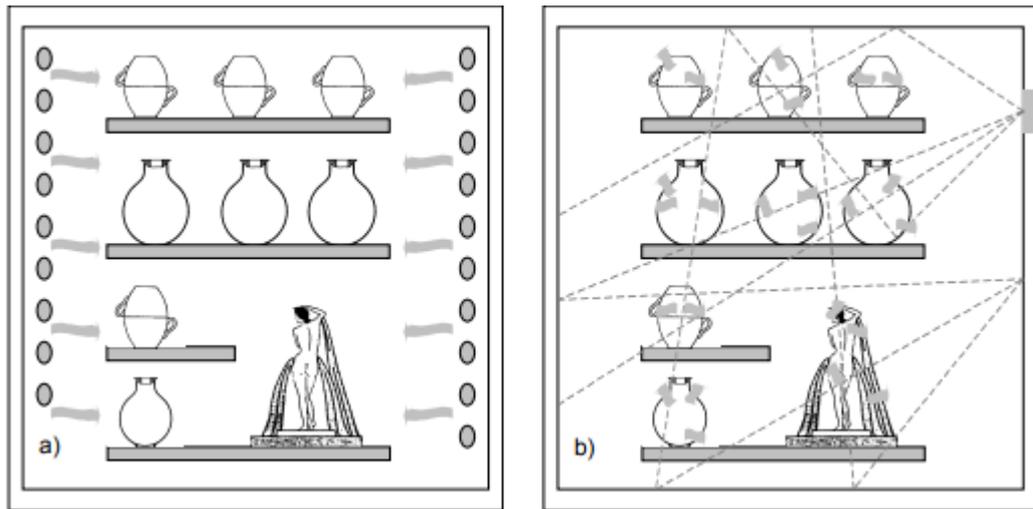
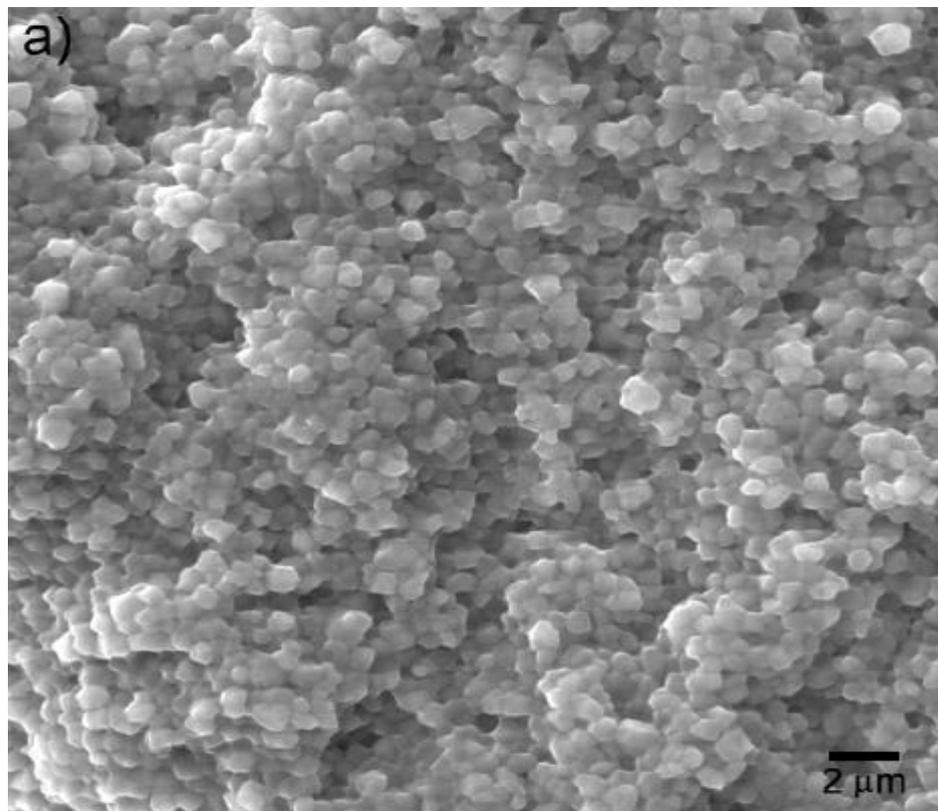


FIGURA 2. Padrão de aquecimento em a) forno convencional e b) forno de microondas [6].

Conforme a análise de Borrell e Salvador (2018), esta técnica promove propriedades desejáveis nas amostras, cerâmicas sinterizadas por microondas possuem em geral uma densidade relativamente maior do que em métodos convencionais, além de reter o tamanho do grão, apresentam em geral menor propagação de trinca no corpo e maior resistência a deformação superficial como pode ser observado na figura 3, embora a diferença em relação ao método convencional seja baixa [1]. Ademais, a sinterização por microondas apresenta uma microestrutura mais aberta e menos densa, com uma área superficial específica maior, devido a este resultado, a sinterização por microondas pode ser útil no desenvolvimento de arquiteturas com melhores propriedades em relação a cinética das reações de trocas superficiais que ocorrem durante o processo de permeação de oxigênio[1].



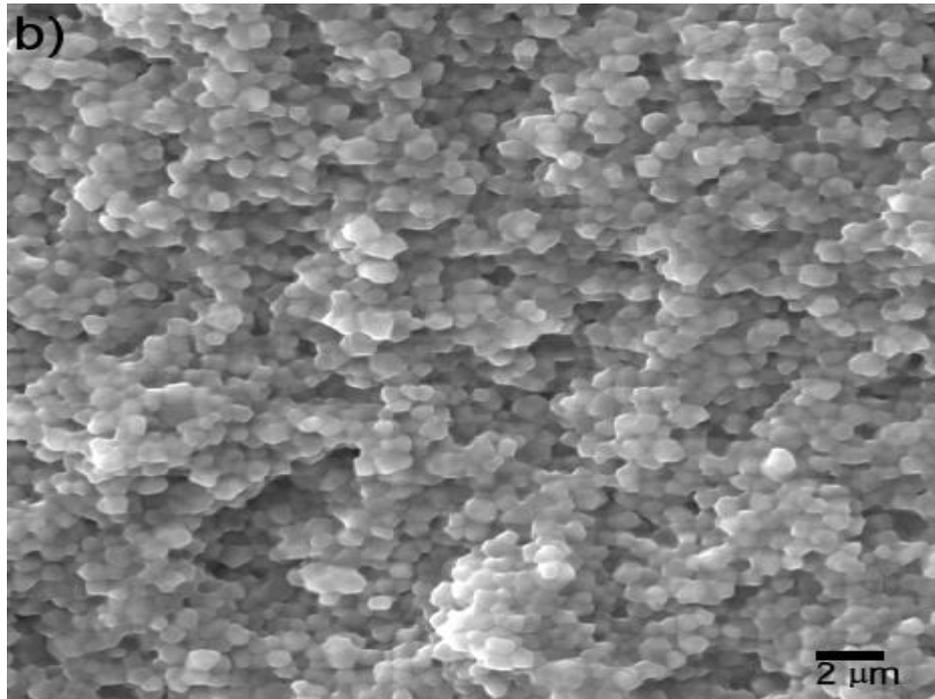


FIGURA 3. Micrografias SEM da superfície de fratura de zircônia MHFS (Tosoh TZ-3Y) processada a 2,45 GHz com nível de potência de 1,8 kW por 20 min (densidade de 99%), a) região interna, b) região próxima à superfície [4].

Além disso, esta técnica é caracterizada pela sua curta duração em relação ao procedimento convencional, gerando uma relevante economia de energia. Embora este método possua inúmeros benefícios, existem algumas dificuldades em sinterizar materiais que não absorvem adequadamente as microondas a baixas temperaturas ou frequências, neste caso o processo requer um longo tempo, o que acarreta em uma série de pontos negativos ao processamento, como heterogeneidades microestruturais, gradientes de temperatura, crescimento exacerbado de grãos [12,7]. Conforme observado por Menezes et al. (2007) a utilização desta técnica em materiais que possuem propriedades dielétricas que são rápida e acentuadamente alteradas com o aumento da temperatura, apresentam necessidade de maior controle de homogeneidade térmica, devido a fácil formação de trincas que comprometem estruturalmente o material, por esta particularidade em alguns tipos de cerâmicas específicas é comum o uso de susceptores para auxiliar o controle [6]. Ademais, este método possui um sistema de regular temperatura e controle difíceis, sendo necessário o auxílio de outros mecanismos para que o controle seja efetivo e a constante necessidade de adaptação do forno para a sinterização de diferentes cerâmicas, atentando-se ao fenômeno “thermal runaway” que não consegue ser controlado em todos os processamentos cerâmicos, devido a particularidades das amostras, sendo importante o desenvolvimento de um melhor controle de temperatura e a padronização do procedimento. Outro fator relevante observado é a escassez de estudos referentes a este método comparado a métodos convencionais, sendo imprescindível explorar mais possibilidades que envolvem este método [1].

Enquanto isso, os resultados obtidos na literatura pelo método de cold-sintering apresentam como principais vantagens do uso, conforme observado por Ndayishimwe et al. (2020) sobre a metodologia: o tempo e a temperatura ultrabaixa, além de possuir uma configuração experimental simples, que acarreta uma maior economia de energia do processo [8]. Além disso, de acordo com Grasso et al. (2020) esta técnica possibilita o processamento de materiais dielétricos, que são compostos por múltiplas camadas de cerâmicas e que no processo de sinterização e montagens convencionais precisam de várias etapas com aquecimentos repetitivos, montagem de multicamadas, queima, metalização dos eletrodos, integração com um substrato, enquanto a técnica cold-sintering permite realizar a integração de diferentes partículas em uma única etapa, confeccionando um dispositivo em uma única etapa. Ademais, o método também possibilita a densificação de metamateriais com diversas propriedades dielétricas e a co-sinterização de materiais diferentes com grande diferença de temperatura de processamento [3]. Para mais, esta técnica tem capacidade de fabricar cerâmicas nanoestruturadas,

devido à baixa temperatura de sinterização e tempo [14]. De acordo com Yu et al. (2020) a pré-condição para o uso desta técnica é o material ser solúvel, ao menos um dentre os presentes na amostra [14]. Em termos de microestrutura é possível constatar que amostras processadas por esta técnica apresentaram uma maior densidade comparada a convencional [14]. A figura 5 ilustra o efeito da temperatura no processamento, sendo quanto maior a temperatura do processamento, maior será a quantidade de poros que apareceram, como pode ser observado nas imagens. O processo não aceita temperaturas muito altas, visto que além do processamento perder a vantagem do uso de uma temperatura ultrabaixa, a amostra fica suscetível a trincas e deformações [8].

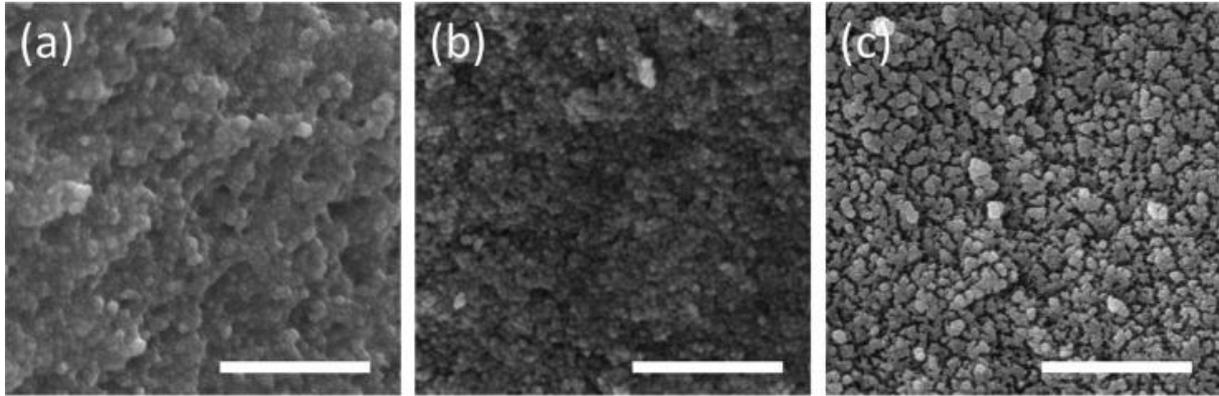


FIGURA 5. Imagens SEM de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sinterizado a frio sob 320 MPa com um solvente eutético profundo (cloreto de colina: ácido malônico, proporção de 1: 1) e (a) 100 ° C, 30 min, (b) 180 ° C, 30 min e (c) 100 ° C, 30 min - 300 ° C, 60 min. Barra de escala: 500 nm [8].

O uso do método cold-sintering é afetado diretamente por fatores físicos e químicos, sendo necessário controlá-los e racionalizar os parâmetros que envolvem o procedimento, entretanto o conhecimento sobre a formação do grão durante a sinterização é limitado, sendo necessário um estudo aprofundado sobre como os parâmetros afetam o grão da amostra durante a sinterização, e seu respectivo comportamento [3]. Outro ponto relevante, conforme observado por Grasso et al. (2020) é a necessidade de um melhor controle na taxa de secagem do líquido, sendo importante o desenvolvimento de configurações alternativas que solucionem este problema. Além disso, cabe salientar o escasso uso de pressões baixas, que são normalmente utilizados em amostras pequenas, sendo interessante abordagens que utilizem baixas pressões regulando o tempo e a temperatura do processo [3].

De acordo com Trombini et al. (2007) a sinterização por plasma tem como principal aplicação a sinterização de cerâmicas nanocristalinas, devido a necessidade de uma microestrutura homogênea e refinada que possibilita a obtenção de materiais com propriedades diferenciadas, devido à dificuldade de processamento por métodos convencionais deste tipo de estrutura, a sinterização por plasma destaca-se como a principal técnica para a sinterização de nanocerâmicas por seu curto tempo de processamento e capacidade de utilização de baixas temperaturas, resultando em uma amostra com grãos homogêneos, maiores densidades e excelentes propriedades mecânicas [13]. Entretanto, os benefícios desta técnica no processamento de nanocerâmicas desaparecem caso a amostra seja exposta a elevadas temperaturas por um longo período, obtendo deste modo os mesmos resultados de métodos convencionais [13].

Uma característica relevante na sinterização por plasma, conforme observado por Silva et al. (1998), é a condução de corrente elétrica obtida através dos íons presentes no gás, que permitem um rápido aquecimento a elevadas taxas, caracterizando um processamento rápido e econômico energeticamente, incluindo a facilidade de operação, alta velocidade de sinterização e alta reprodutibilidade de métodos e seus respectivos resultados [12]. A figura 6 apresenta a micrografia das amostras de alumina 5% sinterizadas via Spark plasma-sintering, ilustrando a homogeneidade das nanopartículas, onde a variável tempo atua como fator que propicia o crescimento do grão [13].

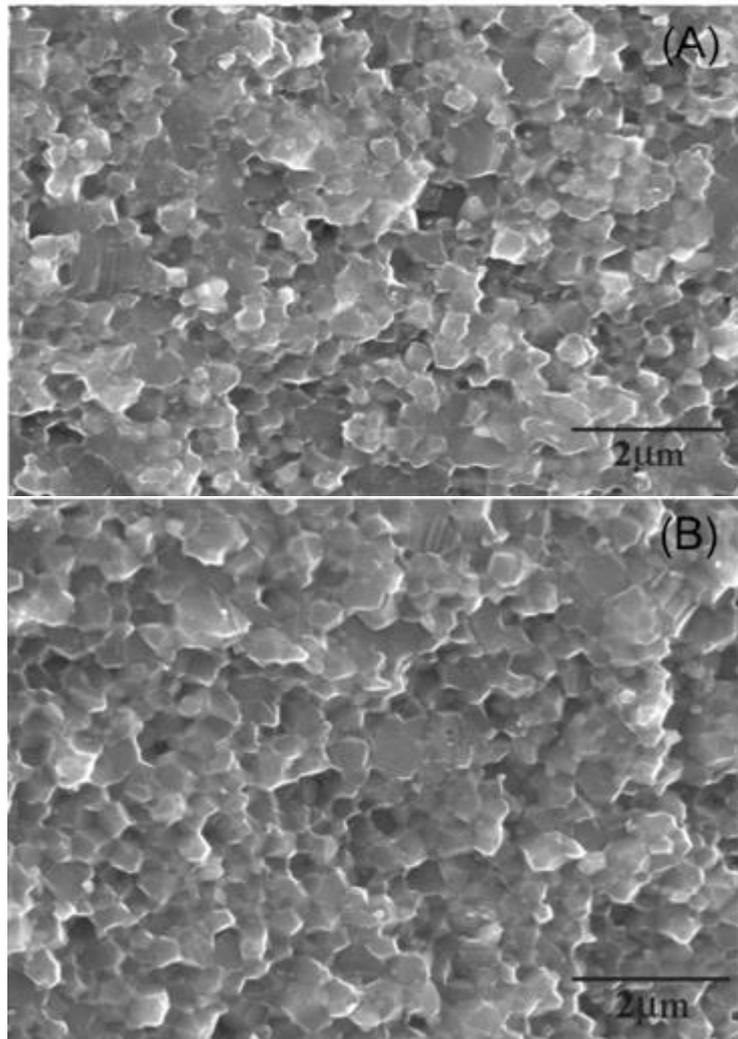


FIGURA 5. Micrografias das amostras de alumina com 5% vol de inclusões nanométricas de zircônia sinterizadas via Spark Plasma Sintering com temperatura de 1300°C por (A) 7 min e (B) 17 min com pressão de 50 Mpa [13].

Os escassos estudos que referem-se a este método e a utilização do plasma em demais abordagens são prejudiciais, haja vista os benefícios obtidos com a utilização deste método, outro ponto relevante é a necessidade de adaptações para diversos tipos de cerâmicas, que faz com que seja necessário mais estudos sobre a sua aplicabilidade para a simplificação da utilização do procedimento [9]. Além disso, o alto custo dos equipamentos e a necessidade de constante limpeza e lubrificação constituem-se como dificuldades, sendo necessária à amplificação do método com mais estudos e pesquisas sobre a viabilidade da utilização de equipamentos mais baratos, sem necessidade de constante limpeza e lubrificação. De acordo com Nogueira (2009), uma dificuldade que limita a aplicação deste método é a impossibilidade do uso de altas pressões devido a utilização da matriz de grafite, que também impossibilita a produção de peças grandes e complexas pelo método, outro problema observado refere-se a formação da fase líquida, que caso ocorra, a amostra tende a deixar a matriz, sendo relevante estudos acerca da utilização de matrizes neste método, para que possibilite a produção de peças grandes e complexas, amostras que passam pela fase líquida e o emprego de altas pressões [9].

## CONCLUSÕES

Tendo em vista os aspectos analisados, é relevante salientar que técnicas de sinterização alternativa são viáveis e possuem resultados promissores de acordo com a literatura, sendo relevante seu aprimoramento, além de fatores que viabilizam o processo em termos de consumo de energia e custo do processo, estas técnicas produzem resultados promissores no aprimoramento de microestruturas das amostras e suas propriedades, embora não sejam aplicáveis a todos os materiais mantendo os mesmos benefícios. Conforme os aspectos apresentados é interessante ressaltar os escassos estudos referente aos

métodos e suas melhorias, haja vista que grande parte dos estudos estão voltados para a reprodução de experimentos e não para a configuração e melhorias dos procedimentos, sendo válido ressaltar a importância de estudos e melhorias dos métodos apresentados.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao grupo Ceramicando, aos meus colegas e a comunidade IFSP, pelo apoio e conhecimentos adquiridos.

## REFERÊNCIAS

- [1]. BORRELL, A.; SALVADOR, M. D. Advanced Ceramic Materials Sintered by Microwave Technology. IntechOpen, out 2018. Disponível em: < <https://www.intechopen.com/books/sintering-technology-method-and-application/advanced-ceramic-materials-sintered-by-microwave-technology>>DOI: 10.5772/intechopen.78831. Acesso em: 25 set 2020.
- [2]. GERMAN, R. M. Sintering: from Empirical Observations to Scientific Principles. Elsevier[online], vol.1, n.1, 2014. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124016828000173>> DOI: 10.1016/b978-0-12-401682-8.00017-3. Acesso em: 19 set 2020.
- [3]. GRASSO, S.; BIESUZ, M.; ZOLI, L.; TAVERI, G.; DUFF, A. I.; KE, D.; JIANG, A.; REECE, M. I. A review of cold sintering processes. Advances in applied ceramics: structural, functional and bioceramics[online], v.119, n.3, jan 2020. Disponível em< <https://doi.org/10.1080/17436753.2019.1706825>>. Acesso em: 27 set 2020.
- [4]. LAKSHMANAN, ARUNACHALAM. Sintering of ceramics – New emerging techniques. InTech, v.1 n.2 p.02-94, 2012.
- [5]. LV, B.; FAN, X.; XIE, H.; WANG, T. J. Effect of neck formation on the sintering of air-plasma-sprayed thermal barrier coating system. Journal of the european ceramic Society[online], v.37, n.3, p. 811-821, fev 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.08.033>>. Acesso em: 24 set 2020.
- [6]. MENEZES, R. R.; SOUTO, P. M.; KIMINAMI, R. H. G. A. Sinterização de cerâmicas em microondas. Parte I: Aspectos fundamentais. Laboratório de Desenvolvimento e Processamento de Materiais em Microondas – LaDProM, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos, 2007. Acesso em: 26 set 2020.
- [7]. MENEZES, R. R.; SOUTO, P. M.; KIMINAMI, R. H. G. A. Parte III: Sinterização de zircônia, mulita e alumina. Laboratório de Desenvolvimento e Processamento de Materiais em Microondas – LaDProM, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos, 2007. Acesso em: 26 set 2020.
- [8]. NDAYISHIMIVE, A.; SENGUL, Y. M.; SADA, T.; DURSUN, S.; HWIBANG, S.; GRADV, A. Z.; TSUJI, K.; FUNAHASHI, S.; VAN DUIN, A. C. T.; RANDALL, C. A. Roadmap for densification in cold sintering: Chemical pathways. Elsevier[online], julho 2020. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666539520300195?via%3Dihub>> Doi: <<https://doi.org/10.1016/j.oceram.2020.100019>> Data de acesso: 25 set 2020.
- [9]. NOGUEIRA, ANA PAULA GOMES. Produção da Liga de Magnésio AZ91 via Spark Plasma Sintering (SPS) [online]- Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Disponível em:< <https://docplayer.com.br/75009189-Universidade-federal-de-santa-catarina-curso-de-graduacao-em-engenharia-de-materiais-ana-paula-gomes-nogueira.html>>. Acesso em 27 out 2020.
- [10]. NUERNBERG, RAFAEL BIANCHINI. Síntese e sinterização em micro-ondas, e caracterização da perovskita Ba<sub>0,5</sub>Sr<sub>0,5</sub>Co<sub>0,8</sub>Fe<sub>0,2</sub>O<sub>3-δ</sub>. D. Universidade Federal de São Carlos, 2014. Acesso em: 26 set 2020. Acesso em: 26 set 2020.
- [11]. SANTOS, NICOLAU DE ALMEIDA. Estudo do processo de sinterização do carbetto de boro com adição de carbono. Instituto De Pesquisas Energéticas e Nucleares. 1995. Disponível em < [http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Nicolau%20de%20Almeida%20Santos\\_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Nicolau%20de%20Almeida%20Santos_M.pdf)>. Acesso em 25 set 2020.

[12]. SILVA, A. G. P.; JUNIOR, C. A. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. *Cerâmica*, v.44, n.290, nov/dez 1998. Disponível em:< [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69131998000600004](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69131998000600004)>. Data de acesso: 26 set 2020.

[13] TROMBINI, V.; PALLONE, E. M. J. A.; MUNIR Z. A.; TOMASI, R. Spark plasma sintering" (SPS) de nanocompósitos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>. *Cerâmica*, v.53, n.325, jan/mar 2007. Disponível em:< [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132007000100009&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132007000100009&script=sci_arttext)>. Data de acesso: 27 set 2020.

[14]. YU, T.; CHENG, J.; LI, L.; SUN, B.; BAO, X.; ZHANG, H. Current understanding and applications of the cold sintering process. Department of Materials, Loughborough University, 2019. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11705-019-1832-1>> Doi:< <https://doi.org/10.1007/s11705-019-1832-1>> Acesso em: 26 set 2020.