

## PROJETO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE UM FGM CERÂMICO

Davi De Carli, [davidecarli010@gmail.com](mailto:davidecarli010@gmail.com)<sup>1</sup>

Izabel Fernanda Machado, [machadoi@usp.br](mailto:machadoi@usp.br)<sup>2</sup>

Marcelo Bertotele Carneiro, [marcelo.b.carneiro@ufes.br](mailto:marcelo.b.carneiro@ufes.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, CEP 29075-910

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, CEP 05508-900

**Resumo:** Material em Gradação Funcional (Functionally Graded Material – FGM) é formado por um gradiente em sua composição de dois ou mais materiais com propriedades distintas, em que a heterogeneidade da microestrutura permite variação de propriedades ao longo do volume. Os FGMs podem ser caracterizados em estruturas contínuas ou em camadas. O processo de fabricação do FGM é uma das áreas de pesquisa mais importantes. Dentre os métodos utilizados, a metalurgia do pó (MP) se destaca, devido a sua ampla variedade de materiais e possibilidade de controle de geometria e microestrutura. Existem várias técnicas que promovem o tratamento térmico de pós compactados, sendo a sinterização por corrente elétrica pulsada (Pulsed Electric Current Sintering – PECS) uma das mais modernas. A desvantagem do FGM na combinação de materiais dissimilares, está nas tensões residuais térmicas decorrentes dos diferentes módulos de elasticidade, coeficiente de expansão térmica e compatibilidade química. O objetivo do trabalho é apresentar o projeto de um FGM cerâmico, fabricado pela MP utilizando a técnica PECS, além de caracterizar a microestrutura com gradiente em camadas e a densidade. Os materiais utilizados na fabricação do FGM foram pós ultrafinos de  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pós nanométricos de 3Y-ZrO<sub>2</sub> e TiC, caracterizando o compósito cerâmico, além de pós finos de WC-Co. Na predição da tensão residual foi utilizado um modelo termomecânico unidimensional. Na sinterização por PECS, as amostras foram tratadas a 1425°C, com tempo de patamar de 7 minutos, pressão uniaxial de 50 MPa e atmosfera em vácuo. A microestrutura foi caracterizada por microscopia óptica após a preparação metalográfica. A avaliação da densidade experimental foi feita pelo princípio de Arquimedes em uma balança semi-analítica e a densidade teórica a partir da regra das misturas inversa. A predição indicou tensão residual trativa nas camadas mais ricas em cerâmica, todavia abaixo do limite de resistência à fratura do material. Não se observou, na análise por microscopia, trincas devido a tensão residual ao longo da microestrutura. As diferentes frações de volume dos constituintes permitiram evidenciar o gradiente em camadas. O valor médio de densidade relativa foi de 98,68%, significando 1,32% de porosidade. Conclui-se que o projeto de tensão residual e a sinterização por PECS permitem fabricar um FGM isento de trincas e com elevada densidade.

**Palavras-chave:** FGM, PECS, Cerâmica, Tensão residual, Densidade.

### 1. INTRODUÇÃO

O mecanismo de remoção de material pelo processo de usinagem, baseia-se na utilização de uma ferramenta fabricada com material de maior dureza e resistência que a peça. O desenvolvimento de novos materiais e ligas com elevada resistência mecânica e dureza, bem como novas técnicas de fabricação, contribuem para o surgimento, inclusive, de novos materiais de ferramentas de corte. Nesse contexto, tem-se uma nova classe de materiais compósitos denominada de Material em Gradação Funcional (Functionally Graded Material – FGM), como uma possível solução às falhas que os materiais compósitos homogêneos exibem quando submetidos a ciclos de variação de temperatura, devido a diferença entre os coeficientes de expansão térmica das fases constituintes (Machado *et al.*, 2009; Boggarapu *et al.*, 2021).

Yang *et al.* (2015) definem o FGM como materiais compósitos formados por dois ou mais materiais constituintes, em que ocorre uma variação gradual nas frações das fases ao longo da espessura. Essa característica leva a uma mudança gradativa nas propriedades mecânicas e térmicas no produto formado. Existem duas estruturas típicas para os FGMs: contínua e em camadas. Na primeira a mudança da composição e/ou estrutura ocorre na forma de um suave degradê. Na segunda o gradiente ocorre na forma de camadas, dando origem a uma estrutura multicamadas com linhas discretas entre as interfaces (Watanabe; Sato, 2011).

O processo de fabricação do FGM é uma das áreas de pesquisa mais relevantes. Existem vários métodos relatados, que incluem a metalurgia do pó, deposição química a vapor e pela síntese de combustão. Dentre esses, a metalurgia do pó (MP) se destaca devido a ampla variedade de materiais que podem ser empregados, além de possibilitar o controle da

geometria e microestrutura (Ma; Tan, 2001). Kalpakjian e Schmid (2009) dividem o processo MP em cinco operações típicas: fabricação dos pós, mistura, compactação, sinterização e operações de acabamento.

Kang (2005) define a sinterização como uma técnica de processamento usada para produzir materiais com densidade controlada a partir de pós metálicos e/ou cerâmicos, fazendo uso de energia térmica. As técnicas convencionais de sinterização são classificadas em: sem pressão (PS); e com aplicação de pressão, sendo as mais comuns a prensagem a quente (HP) e prensagem isostática a quente (HIP). Além destas, tem-se técnicas mais modernas como a sinterização por corrente elétrica pulsada (*Pulsed Electric Current Sintering – PECS*), que promove a sinterização com aplicação de corrente elétrica e carregamento mecânico diretamente sobre o pó dentro de um molde. Algumas vantagens como menor temperatura de sinterização, menor tempo de patamar e melhorias significativas nas propriedades dos materiais sinterizados tornam o PECS vantajoso em relação as técnicas convencionais (Upadhyaya, 2002; Wang *et al.*, 2013).

Na combinação de um FGM metal-cerâmico, podem surgir tensões residuais durante o resfriamento após alcançar elevadas temperaturas de processo, podendo exceder a resistência à fratura da cerâmica, levando o aparecimento de trincas. Tais tensões ocorrem devido a diferença entre os módulos de elasticidade, coeficiente de expansão térmica e a compatibilidade química. Dessa forma, Ravichandran (1995) cita a importância de se utilizar um modelo termomecânico que considere a mudança gradual nas frações de volume dos constituintes para a predição da tensão residual, a fim de prever se a mesma não ultrapassa a tensão de ruptura do material mais frágil.

O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto de um FGM cerâmico-metal duro, a partir de um modelo de predição de tensão residual unidimensional, além de fabricar pelo processo MP, fazendo uso da técnica PECS. Por fim, avaliar o desempenho da sinterização através da análise de microscopia óptica e densidade relativa.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Projeto do FGM e materiais utilizados

A estrutura do FGM foi projetada a partir do modelo descrito por Ravichandran, a fim de evitar as possíveis trincas térmicas ou delaminação durante o aquecimento ou resfriamento na etapa de sinterização. As frações de volume da cerâmica e do metal duro variaram ao longo da espessura da amostra ( $y$ ), sendo levado em consideração para determinação do módulo de elasticidade ( $E(y)$ ) e coeficiente de expansão térmica ( $\alpha(y)$ ), como mostrado nas Eq. (1) e Eq. (2), em que os subscritos  $m$  e  $p$  indicam metal e cerâmica. Essas equações são consideradas quando a diferença entre os coeficientes de expansão térmica for menor que  $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

$$E(y) = E_m(1 - V_p) + E_p V_p. \quad (1)$$

$$\alpha(y) = \alpha_m(1 - V_p) + \alpha_p V_p \quad (2)$$

A tensão residual recebe contribuições do equilíbrio de tensões ( $\sigma_r$ ) entre tração e compressão, de acordo com a Eq. (3), e do equilíbrio de momentos ( $M_t$ ) devido a assimetria das tensões internas através da espessura surgidas a partir da variação na porção dos constituintes, apresentado na Eq. (4). A partir do equilíbrio de momentos, tem-se tensões de flexão de acordo com a Eq. (5).

$$\sigma_r(y) = \frac{\alpha(y)E(y)\Delta T}{\text{tração}} - \frac{E(y) \frac{\int_{-y}^y \alpha(y)E(y)\Delta T}{\int_{-y}^y E(y)dy}}{\text{compressão}} \quad (3)$$

$$M_t = \int_{-y}^y \sigma_r(y)ydy \quad (4)$$

$$\sigma_b(y) = M_t E(y) \frac{y \int_{-y}^y E(y)dy - \int_{-y}^y E(y)ydy}{\int_{-y}^y E(y)dy \int_{-y}^y E(y)y^2dy - [\int_{-y}^y E(y)ydy]^2}. \quad (5)$$

A partir dessas duas contribuições, pode-se calcular a tensão residual ( $\sigma_{res}$ ), conforme Eq. (6).

$$\sigma_{res}(y) = E(y) \left[ \alpha(y) - \frac{A_1}{E_1} + \frac{\left\{ A_2 - \frac{A_1}{E_1} E_2 \right\} (yE_1 - E_2)}{\{ E_1 E_3 - E_2^2 \}} \right] \Delta T \quad (6)$$

Na qual,  $A_1 = \int_{-c}^c \alpha(y)E(y)dy$ ;  $A_2 = \int_{-c}^c \alpha(y)E(y)ydy$ ;  $E_1 = \int_{-c}^c E(y)dy$ ;  $E_2 = \int_{-c}^c E(y)ydy$ ;  $E_3 = \int_{-c}^c E(y)y^2dy$ ; e  $\Delta T$  é a variação da temperatura de sinterização.

O FGM foi projetado e fabricado para possuir um gradiente com 8 camadas ao longo da espessura com diferentes frações volumétricas de pós de cerâmica ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-TiC}$ ) e metal duro ( $\text{WC-6Co}$ ). A amostra foi dimensionada para ter área de 15x15 milímetros com a espessura de 1 milímetro por camada.

Na síntese da cerâmica a base de alumina, uma balança com escala de precisão de 0,001g, modelo AD200 (Marte) foi utilizada para separar a massa de cada constituinte. Os pós de óxido de alumínio ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 99,99% pureza, 70% fração de volume) foram misturados com os pós de óxido de zircônia estabilizado com óxido de ítria ( $3\text{Y-ZrO}_2$ , 99,5% pureza, 10% de fração de volume) e com os pós de carboneto de titânio ( $\text{TiC}$ , 98% pureza, 20% fração de volume) por um período de 24 horas em meio líquido de álcool isopropílico em um agitador tipo Wagner (New Lab). Para auxiliar a mistura, foram utilizados elementos de moagem na proporção mássica de 6:1. Após a mistura, os pós foram secos em uma estufa, modelo NL80/42 (New Lab), durante 24 horas. Na Tab. 1 são apresentadas as informações dos pós utilizados.

Tabela 1. Características dos pós utilizados.

| Material                | Tamanho médio da partícula [ $\mu\text{m}$ ] | Densidade [ $\text{g/cm}^3$ ] | Módulo de elasticidade [GPa] | Coefficiente de expansão térmico [ $10^{-6}\text{C}^{-1}$ ] |
|-------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0,20                                         | 3,97                          | 380                          | 8,5                                                         |
| $3\text{Y-ZrO}_2$       | 0,04                                         | 5,90                          | 220                          | 10,8                                                        |
| $\text{TiC}$            | 0,08                                         | 4,93                          | 450                          | 7,6                                                         |
| $\text{WC-6Co}$         | 1,5                                          | 14,90                         | 630                          | 5,5                                                         |

Os pós de metal duro foram adicionados aos pós de cerâmica em diferentes frações de volume para formar o gradiente em camadas. Na Fig. 1 é mostrado uma representação esquemática do FGM, indicando a composição da primeira e oitava camada. Para isso, seguindo o mesmo procedimento de síntese da cerâmica, a balança de precisão citada anteriormente foi utilizada para separar as massas de cada material ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-TiC}$  e  $\text{WC-6Co}$ ) em diferentes frações e acondicioná-las em diferentes recipientes. Estes, foram agitados por um período de 24 horas em meio líquido de álcool isopropílico, com auxílio de elementos de moagem na proporção mássica de 6:1. Após a mistura, os pós foram secos em estufa durante 24 horas.

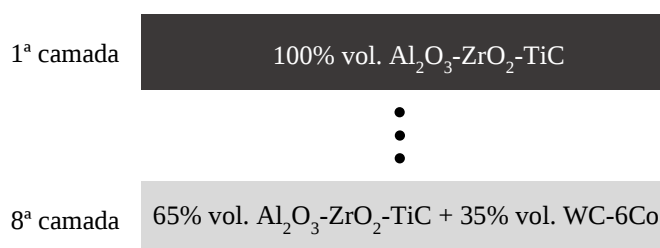


Figura 1. Frações de volume de cerâmica e metal duro nos FGMs.

## 2.2. Fabricação dos FGMs

Para a execução da etapa de sinterização, os pós foram colocados camada a camada dentro do molde de grafite, classe MBIS60X (Morganite), ilustrado na Fig. 2, com uma leve compactação entre as camadas. Para evitar adesão dos pós nas paredes do molde e faces das punções, foi utilizado uma folha de grafite (Grafoil GBT da Morganite). Esse procedimento também facilitou a retirada das amostras após o processamento.

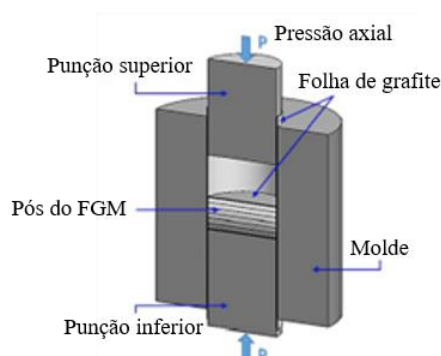


Figura 2. Montagem do molde para sinterização.

Fonte: Adaptado de Bertolete *et al.* (2020)

A densificação das amostras foi realizada pela técnica de sinterização por corrente elétrica pulsada (PECS), utilizando a máquina modelo 1050 (SPS Syntex Inc.) ilustrada na Fig. 3.

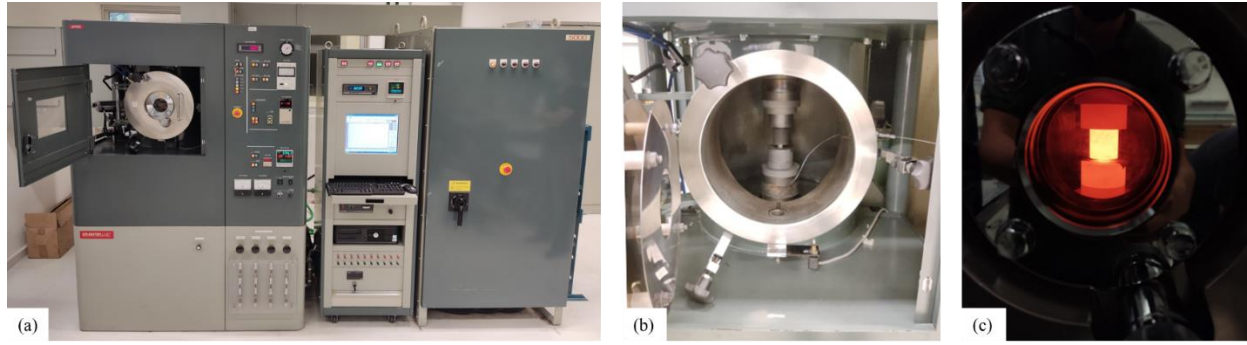


Figura 3. Etapa de sinterização. (a) Máquina; (b) Posicionamento do molde; (c) realização da operação.

A etapa de sinterização ocorreu sob uma pressão uniaxial de 50 MPa imposta ao pó sob vácuo de  $\sim 10$  Pa. A taxa de aquecimento da temperatura ambiente até  $600^\circ\text{C}$  foi de  $104^\circ\text{C}/\text{min}$ , e de  $600^\circ\text{C}$  até  $1425^\circ\text{C}$  foi de  $94^\circ\text{C}/\text{min}$ . O padrão de pulso de corrente elétrica de 12 On 2 Off foi usado com 3,3 ms de duração do pulso.

### 2.3. Preparação das amostras para microscopia óptica e análise da densidade

Após a sinterização, as amostras foram seccionadas em duas partes em uma cortadora metalográfica IsoMet 4000 (Buehler) com disco diamantado 15 HC (Buehler). Uma parte das amostras seccionadas foram embutidas em uma prensa embutidora metalográfica modelo EFD 30 (Fortel) com resina fenólica (baquelite) para serem analisadas por microscopia óptica. As amostras embutidas foram desbastadas utilizando pó de carbetto de silício (SiC) nas granulometrias #400, #600 e #1000, e polidas em pano de Nylon PSA (Buehler) com pasta diamantada MetaDi II (Buehler) com tamanho de partícula de 15, 6 e  $1\ \mu\text{m}$  em politriz PLFDV (Fortel).

Com a outra parte das amostras seccionadas, foi realizado a análise de densidade relativa seguindo a norma ISO 10545-3 (2015) baseada no princípio de Arquimedes. Para isso, foi utilizado a balança de precisão AD200 (Marte) e kit hidrostático. A densidade experimental ( $\rho_{exp}$ ) foi determinada pela Eq. (7).

$$\rho_{exp} = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \rho_{H_2O} \quad (7)$$

onde:  $m_1$  é a massa da amostra seca,  $m_2$  é a massa da amostra impregnada com água e  $m_3$  é a massa da amostra enquanto suspensa na água destilada.

A densidade da água destilada foi determinada por  $\rho_{H_2O} = 1,0017 - 0,0002135T$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ], em que  $T$  é a temperatura da água em  $^\circ\text{C}$ . Para o cálculo da densidade teórica ( $\rho_t$ ), foi utilizado a regra das misturas inversa conforme mostrado na Eq. (8) (German, 1996).

$$\frac{1}{\rho_t} = \frac{m\%_{cerâmica}}{\rho_{cerâmica}} + \frac{m\%_{metal\ duro}}{\rho_{metal\ duro}} \quad (8)$$

A determinação da densidade da cerâmica ( $\rho_{cerâmica}$ ) e do metal duro ( $\rho_{metal\ duro}$ ) foi obtida a partir dos dados do fabricante, e ( $m\%$ ) representa a porcentagem de massa de cada constituinte. Por fim, a densidade relativa ( $\rho_{rel}$ ) foi obtida a partir da razão entre a densidade experimental e teórica, Eq. (9).

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{exp}}{\rho_t} \cdot (100\%) \quad (9)$$

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A predição da tensão residual ( $\sigma_{res}$ ) calculada no centro de cada camada, a partir do modelo de Ravichandran, está apresentado na Tab. 2.

Tabela 2. **Tensão residual predita.**

| Camada | $\sigma_{res}$ [GPa] |
|--------|----------------------|
| 1      | 0,57                 |
| 2      | 0,43                 |
| 3      | 0,27                 |
| 4      | 0,11                 |
| 5      | -0,67                |
| 6      | -0,25                |
| 7      | -0,45                |
| 8      | -0,66                |

O sinal positivo indica que a tensão é de tração e o negativo de compressão. Xu *et al.* (2001) obtiveram limite de resistência a fratura de 0,82 GPa para amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC com 98% de densidade relativa, sinterizadas por prensagem a quente com pressão uniaxial de 35 MPa e temperatura de patamar de 1750°C. Deng *et al.* (2005) sinterizaram por prensagem a quente  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC com pressão de 32 MPa e temperatura de 1700°C, obtendo limite de resistência à ruptura de 0,80 GPa. Considera-se, então, que a tensão residual máxima predita está abaixo da menor que a tensão de ruptura do composto cerâmico.

Na Fig. 4 está apresentado a micrografia do FGM cerâmico/metal duro. Pela micrografia é possível notar as 8 camadas do FGM proposto bem definidas, sendo a primeira camada com 100%vol. de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ -TiC, e nas demais camadas intermediárias houve o acréscimo de WC-6Co, sendo a última composta por 65%vol. de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ -TiC e 35%vol. de WC-6Co. Foi possível verificar também que não houve presença de trincas entre as camadas intermediárias, nem perpendiculares a superfície livre e ao longo da seção transversal, demonstrando que o modelo de predição foi satisfatório. Porém, verifica-se a presença de manchas claras na microestrutura, representando, possivelmente, segregação de material singular,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ -TiC ou WC-6Co, devido aos fenômenos de transporte de massa durante a sinterização, causado por diferença de tamanho de partícula entre os pós, pressão e temperatura.

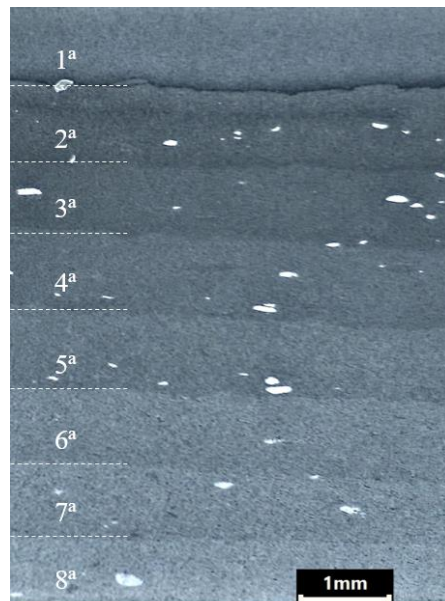


Figura 4. **Microscopia óptica da amostra FGM.**

Na Tab. 3 tem-se a avaliação do desempenho da sinterização por PECS através da análise da densidade do FGM repetida por 15 vezes.

Tabela 3. **Avaliação da densidade do sinterizado.**

| Amostra                                                   | $\rho_{exp}$ [g/cm <sup>3</sup> ] | $\rho_t$ [g/cm <sup>3</sup> ] | $\rho_{rel}$ [%] |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------|
| FGM $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ -TiC + WC-Co | 6,12 ± 0,05                       | 6,20                          | 98,68 ± 0,74     |

De acordo com a Tab. 3, a densidade experimental ( $\rho_{exp}$ ) foi de 6,12 g/cm<sup>3</sup>. A densidade teórica ( $\rho_t$ ) foi estimada em 6,20 g/cm<sup>3</sup>. Consequentemente, obteve-se um FGM com densidade relativa ( $\rho_{rel}$ ) de 98,68%, o que implica um nível de porosidade de 1,32%. Esse resultado demonstra uma elevada taxa de densificação, sendo uma das mais importantes variáveis que envolve o estudo de sinterização (German, 1996). Bertolete *et al.* (2020) sinterizaram um FGM  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC+WC-Co com 6 camadas por PECS nas condições de sinterização de 70 MPa e 1300°C. Ao realizar o ensaio de densidade, constataram que as amostras ficaram próximas da densificação completa (99,65%).

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um projeto de FGM cerâmico/metal duro a partir do uso de um modelo termomecânico unidimensional. Os resultados indicaram tensão residual de tração nas primeiras camadas ricas em óxido de alumínio, todavia abaixo do limite de resistência à ruptura do material. Após a fabricação da amostra e análise por microscopia óptica, observou-se que não existia trincas na amostra com origem do tratamento térmico, ratificando a utilidade do modelo. As segregações notadas nas camadas precisam de maior investigação para melhor compreensão do fenômeno, a fim de evitá-lo. A sinterização por PECS mostrou-se eficiente, possibilitando a obtenção de um FGM próximo da completa densificação (98,68%).

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPES (processo 083/2019), ao CNPq e a CAPES pelo fomento à pesquisa.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ASTM C1327-15, 2015, “Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics”, ASTM International.
- Bertolete, M., Barbosa, P.A., Rossi, W., Fredericci, C. e Machado, I.F., 2020, “Mechanical characterisation and machining evaluation of ceramic cutting tools functionally graded with six layers”, *Ceramics International*, Vol. 46, pp. 15137-15145.
- Boggarapu, V., Gujjala, R., Ojha, S., Acharya, S., Babu, P.V., Chowdary, S. e Gara, D.K., 2021, “State of the art in functionally graded materials”, *Composite Structures*, Vol. 262, pp. 1-29.
- Deng, J., Can, T. e Sun, J., 2005, “Microstructure and mechanical properties of hot-pressed  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$  ceramic composites with the additions of solid lubricants”, *Ceramics International*, Vol. 31, pp 249-256.
- German, R. M., 1996, *Sintering theory and practice*. Ed. John Wiley & Sons, Inc., Pennsylvania, EUA, 550 p.
- Kalpakjian, S. e Schmid, S.R., 2009, *Manufacturing Engineering and Technology*. Ed. Pearson, 6 edition, London, England, 1176 p.
- Kang, S.J.L., 2005, *Sintering: Densification, Grain Growth, And Microstructure*. Ed. Elsevier, Oxford, England, 279 p.
- Ma, J. e Tan, G.E.B., 2001, “Processing and characterization of metal-ceramics functionally gradient materials”, *Journal Material Processing Technology*, Vol. 113, pp. 446-449.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Silva, M.B., 2009, *Teoria da usinagem dos materiais*. Ed. Edgard Blücher, 1 edição, São Paulo, Brazil, 371 p.
- Ravichandran, K.S., 1995, “Thermal Residual Stresses in A Functionally Graded Material System”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 201, pp. 269-276.
- Upadhyaya, G.S., 2002, *Powder Metallurgy Technology*. Ed. Cambridge International Science Publishing, Cambridge, England, 160 p.
- Wang, L., Zhang, J. e Jiang, W., 2013, “Recent Development in Reactive Synthesis of Nanostructured Bulk Materials by Spark Plasma Sintering”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 39, pp. 103-112.
- Watanabe, Y. e Sato, H., 2011, *Review fabrication of functionally graded materials under a centrifugal force, in: Nanocomposites with unique properties and applications in medicine and industry*. Ed. Dr. John Cuppoletti, InTech, 360 p.
- Xu, Ch., Ai, X. e Huang, Ch., 2001, “Fabrication and performance of an advanced ceramic tool material”, *Wear*, Vol. 249, pp. 503-508.
- Yang, K., Feng, W.Z., Peng, H.F. e Lv, J., 2015, “A new analytical approach of functionally graded material structures for thermal stress BEM analysis”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, pp. 26-32.

#### 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

## DESIGN, FABRICATION AND DENSITY EVALUATION OF A CERAMIC FGM

Davi De Carli, [davidecarli010@gmail.com](mailto:davidecarli010@gmail.com)<sup>1</sup>

Izabel Fernanda Machado, [machadoi@usp.br](mailto:machadoi@usp.br)<sup>2</sup>

Marcelo Bertolete Carneiro, [marcelo.b.carneiro@ufes.br](mailto:marcelo.b.carneiro@ufes.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Federal University of Espírito Santo, Zip code 29075-910

<sup>2</sup>Department of Mechatronics Engineering and Mechanical Systems, Polytechnic School, University of São Paulo, Zip code 05508-900

**Abstract.** *The objective of this work is to present the design of a ceramic FGM, manufactured by powder metallurgy using the pulsed electric current sintering technique (PECS); besides characterizing the stepwise microstructure and density. The materials used were  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3Y-ZrO<sub>2</sub>, and TiC powders, defining the ceramic composite, in addition to WC-Co powders. For the prediction of residual stress, a one-dimensional thermomechanical model was used. The samples were sintered at 1425°C, with a dwell time of 7 minutes, uniaxial pressure of 50 MPa, and a vacuum atmosphere. The microstructure was characterized by optical microscopy. The evaluation of the experimental density was made by Archimedes' principle and the theoretical density from the rule of inverse mixtures. The results showed residual tensile stress in the ceramic-rich layers; however, below the fracture strength limit of the material. No cracks due to residual stress along the microstructure were observed in the microscopy analysis. The different volume fractions of the constituents made it possible to evidence the layered gradient. The average relative density was 98.68%, meaning 1.32% porosity. It is concluded that the residual stress design and PECS sintering allowed the fabrication of a FGM free of cracks and with high density.*

**Keywords:** FGM, PECS, ceramics, residual stress, density