

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL EM GRADAÇÃO FUNCIONAL DE METAL DURO E AÇO RÁPIDO PARA FERRAMENTA DE CORTE

Giovani Favatti Braschi, giovani.braschi@usp.br¹

José Antônio Eiras, eiras@df.ufscar.br²

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br^{3,4}

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br⁴

Marcelo Bertolete Carneiro, bertolete@sc.usp.br^{1,4}

¹Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, CEP 13566-590, São Carlos/SP

²Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, CEP 13565-905, São Carlos/SP

³Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, CEP 29075-910, Vitória/ES

⁴Centro de Lasers e Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CEP 05508-000, São Paulo/SP

Resumo: Material em gradação funcional (Functionally Graded Material – FGM) tem sido considerado como uma nova classe de material, na qual materiais com propriedades distintas são unidos na forma de um gradiente, formando uma unidade estrutural com propriedades não uniformes. O objetivo deste trabalho é apresentar a caracterização de amostras em gradação funcional de metal duro e aço rápido. Para tanto, foram utilizados pós de metal duro (K20) e aço rápido (T6), que foram sinterizados por uma técnica comumente conhecida como SPS (Spark Plasma Sintering). A caracterização foi feita a partir da avaliação da microestrutura em microscópio laser confocal e eletrônico de varredura, determinação da densidade relativa pelo princípio de Arquimedes e avaliação do perfil de dureza Vickers ao longo seção transversal das amostras. Os resultados mostraram uma microestrutura com ausência de trincas de origem térmica, com maior valor de densidade relativa de 98,70% e com variação no perfil de dureza ao longo da espessura da amostra, o que evidencia propriedades não uniformes.

Palavras-chave: Material em gradação funcional, Sinterização SPS, Ferramentas de corte, Densidade relativa, Dureza Vickers.

1. INTRODUÇÃO

Características históricas como desenvolvimento da indústria de transportes, da sociedade de consumo e conflitos bélicos forçaram o surgimento de dois importantes materiais de ferramentas de corte, primeiro o aço-rápido e depois o metal duro, enquanto que melhorias na estrutura das máquinas-ferramentas, a introdução do comando numérico e a necessidade de usinar materiais de difícil usinabilidade, impulsionaram o desenvolvimento dos materiais cerâmicos e ultraduros, chamados de terceira geração (Shaw, 2005; Mills, 1996). Segundo Machado et al. (2015), o material ideal para ferramentas de corte seria, hipoteticamente, aquele que apresentasse a dureza do diamante, a tenacidade do aço rápido e a inércia química da alumina. Porém, estruturas homogêneas não apresentam tais características, nesse sentido, uma aproximação, admitida, seria a fabricação de insertos com materiais em gradação funcional.

O termo material em gradação funcional (Functionally Graded Material – FGM) é definido, basicamente, como uma unidade estrutural formada a partir de dois materiais (fases), onde a fração volumétrica da segunda fase aumenta ao longo da espessura, de modo que a estrutura, a composição e a morfologia varia suavemente na forma de um gradiente que pode ser contínuo ou em camadas (Kawasaki; Watanabe, 1997; Mott; Evans, 1999). Segundo Watanabe e Sato (2011) FGMs são de interesse prático, porque uma grande gama de propriedades físicas e/ou químicas podem ser alcançadas através do projeto da estrutura.

Segundo Gillia e Caillens (2010) a metalurgia do pó é um ótimo processo de fabricação para produzir componentes com as propriedades variando na forma de gradiente, pois permite o desenvolvimento e mistura dos pós, o projeto da microestrutura, a modelagem da peça e, finalmente, a densificação da mesma por sinterização. German (1996) define sinterização como um tratamento térmico que une as partículas do pó através de eventos de transporte de massa em escala atômica, para formar um corpo sólido e denso. Deste modo, o estabelecimento de ligações entre as partículas e o devido controle da microestrutura, beneficia enormemente as propriedades do material.

A técnica de sinterização *Spark Plasma Sintering* (SPS), tem sido citada na literatura (Tokita, 2000; Orrù et al., 2009; Gillia; Galliens, 2010; Watanabe; Sato, 2011) como um meio eficaz de se obter estruturas em FGM de boa qualidade. Este método se caracteriza por um sistema de prensagem uniaxial, por meio de punções, que promovem o carregamento mecânico sobre o molde, usualmente, feito de grafite, e por uma fonte de potência que provoca descargas de corrente elétrica contínua em curtos períodos de tempo (pulsos), elevando a temperatura e promovendo a sinterização por efeito Joule e/ou transferência de calor. As vantagens da SPS em relação às técnicas tradicionais de sinterização são

alta taxa de aquecimento, tempos de operação mais curtos, menor temperatura de trabalho e maior controle da mesma. Dessa forma, pode-se conseguir a produção de materiais de alta qualidade e de maneira mais eficiente.

O objetivo deste trabalho é apresentar a caracterização da microestrutura, densidade e dureza de amostras de FGM de metal duro e aço-rápido, fabricadas por SPS, visando no futuro a utilização do material como ferramenta de corte com tenacidade aumentada.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados foram pós de metal duro, classe K20 (Sandvik), e aço-rápido, S290 (Böhler), semelhante a um T6. Na Tabela (1) apresenta-se algumas características dos materiais.

Tabela 1. Características dos materiais utilizados.

Materiais	Tamanho de partícula [μm]	Densidade [g/cm^3]	Mód. Elasticidade [GPa]	Coef. Exp. Térmico [$\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]	Coef. Condutividade [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$]
Metal duro	1,5	14,90	630	5,5	80
Aço-rápido	50	8,30	242	9,6	19

A fração de volume de material utilizada para a fabricação do FGM metal duro/aço-rápido é apresentada na Tab. (2). Nota-se que o gradiente projetado ocorre na forma de cinco camadas.

Tabela 2. Fração de volume dos materiais utilizados.

Camadas	Metal duro	Aço-rápido
1	100%	—
2	90%	10%
3	80%	20%
4	70%	30%
5	60%	40%

Após a definição das frações de volume dos FGMs, os pós foram misturados em meio líquido com álcool isopropílico, fazendo uso de elementos de moagem a uma taxa mássica de 2:1. Após esse procedimento, os mesmos foram secos em uma estufa, modelo 404D (Ethik) e posteriormente desaglomerados.

A sinterização do FGM metal duro/aço-rápido foi executada em uma máquina de SPS, modelo 1020 (SPS Syntex Inc.). Foram fabricadas duas amostras, denominadas de Amostra 1 e Amostra 2. As condições de operação para a primeira amostra foram temperatura de trabalho de 1100°C , carregamento uniaxial de 40 MPa, taxa de aquecimento de $100^\circ\text{C}/\text{min}$ e tempo de patamar térmico na temperatura de trabalho de 5 minutos. A segunda amostra foi processada a uma temperatura mais elevada (1140°C). Ambos os tratamentos térmicos ocorreram em vácuo de ~ 10 Pa, com modelo de pulso de corrente elétrica contínua 12:2 (on:off), sendo que a duração de cada pulso foi 3 ms. A Figura (1) ilustra a máquina com destaque para o forno, onde se encontra o molde de grafite entre os punções axiais e, finalmente, durante a operação de sinterização.

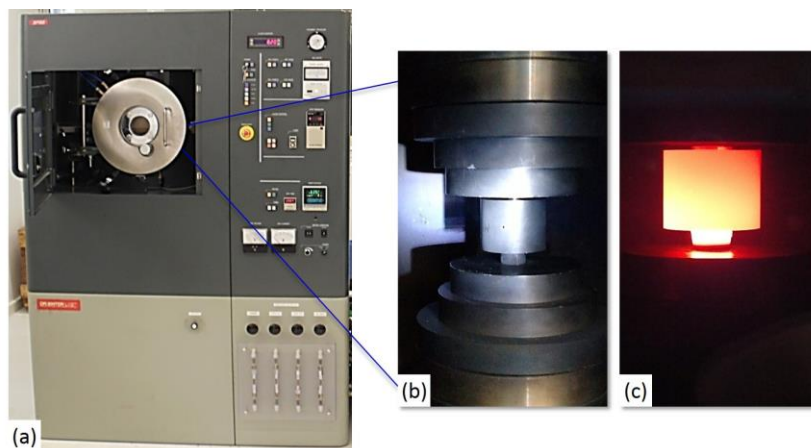


Figura 1. Etapa de sinterização. (a) Máquina de SPS; (b) Posicionamento do molde; (c) Durante a operação.

A caracterização da microestrutura do FGM ocorreu posteriormente à preparação das amostras. Dessa forma, as mesmas foram seccionadas na transversal, utilizando uma cortadora metalográfica, IsoMet 1000 (Buehler), com disco de corte 15HC (Buehler). Na sequência as amostras foram embutidas utilizando uma embutidora à quente, PRE 30MI (Arotec), com o uso de resina fenólica. Com isso realizou-se o lixamento em uma placa de vidro com pós de SiC (Buehler) na grana de 400, 600 e 1000, seguido de polimento com pastas de diamantes de 1, 6 e 15 μm MetaDi II (Buehler), em pano de Nylon PSA (Buehler). A análise da microestrutura foi executada em um microscópio confocal laser, LEXT OLS4100 (Olympus) e em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), TM3000 (Hitachi) para evidenciar as camadas, possíveis defeitos (trincas) e porosidade.

O procedimento para determinar a densidade relativa foi feito com base no princípio de Arquimedes, fazendo uso da norma ISO 10545-3:1997. Para isso utilizou-se uma balança de precisão Marte AD200 (resolução de 0,001 g) com kit hidrostático. Primeiramente, mediu-se a massa seca (m_1) das amostras, para isso as mesmas foram mantidas em estufa a 110°C por 24 horas. Em seguida, 15 medições foram realizadas, retornando-as a estufa por 5 minutos entre cada medição. Na sequência mediu-se a massa suspensa (m_3), utilizando-se o aparato de Arquimedes (kit hidrostático) da balança. Para tanto, as amostras foram aquecidas em água destilada até a temperatura de ebulição por duas horas. Depois resfriadas imersas em água até a temperatura ambiente por pelo menos 4 horas. Foram realizadas 15 medições, com monitoramento da temperatura da água por um termômetro digital de espeto, TM879 (Equitherm). Por fim, mediu-se a massa úmida (m_2). A medição consistiu em retirar a amostra da água destilada e remover o excesso de água das superfícies, antes de colocar na balança. Essa medição foi executada por 15 vezes.

A determinação da densidade experimental das amostras foi feita utilizando as Eq. (1) e (2).

$$\rho_{\text{exp}} = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \rho_{H_2O} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (1)$$

$$\rho_{H_2O} = 1,0017 - 0,0002135T \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde T é a temperatura da água em °C.

Fazendo o uso da regra das misturas (German; Park, 2008), obteve-se a densidade teórica, Eq. (3).

$$\frac{1}{\rho_{\text{teór}}} = \frac{\% \text{massa}_{K20}}{\rho_{K20}} + \frac{\% \text{massa}_{S290}}{\rho_{S290}} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (3)$$

A densidade relativa foi obtida dividindo a densidade experimental pela densidade teórica, Eq. (4).

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_{\text{teór}}} 100 \text{ [\%]} \quad (4)$$

Por fim, ensaio de dureza Vickers foi executado ao longo da seção transversal das amostras para evidenciar a variação da propriedade. A carga utilizada durante o ensaio foi de 30 kgf, aplicada durante 15 segundos na amostra, conforme ASTM C1327-08:2008.

A Figura (2) ilustra a metodologia experimental indicando as etapas onde ocorreram as caracterizações.

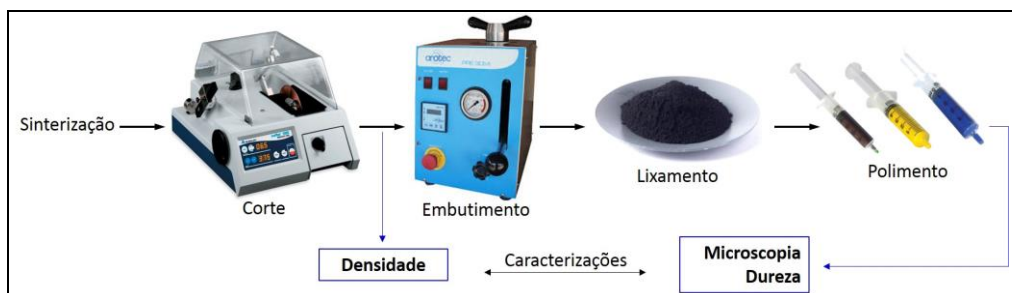


Figura 2. Fluxograma das atividades experimentais.

3. RESULTADOS

Na Figura (3) são apresentadas as micrografias do FGM metal duro/aço-rápido.

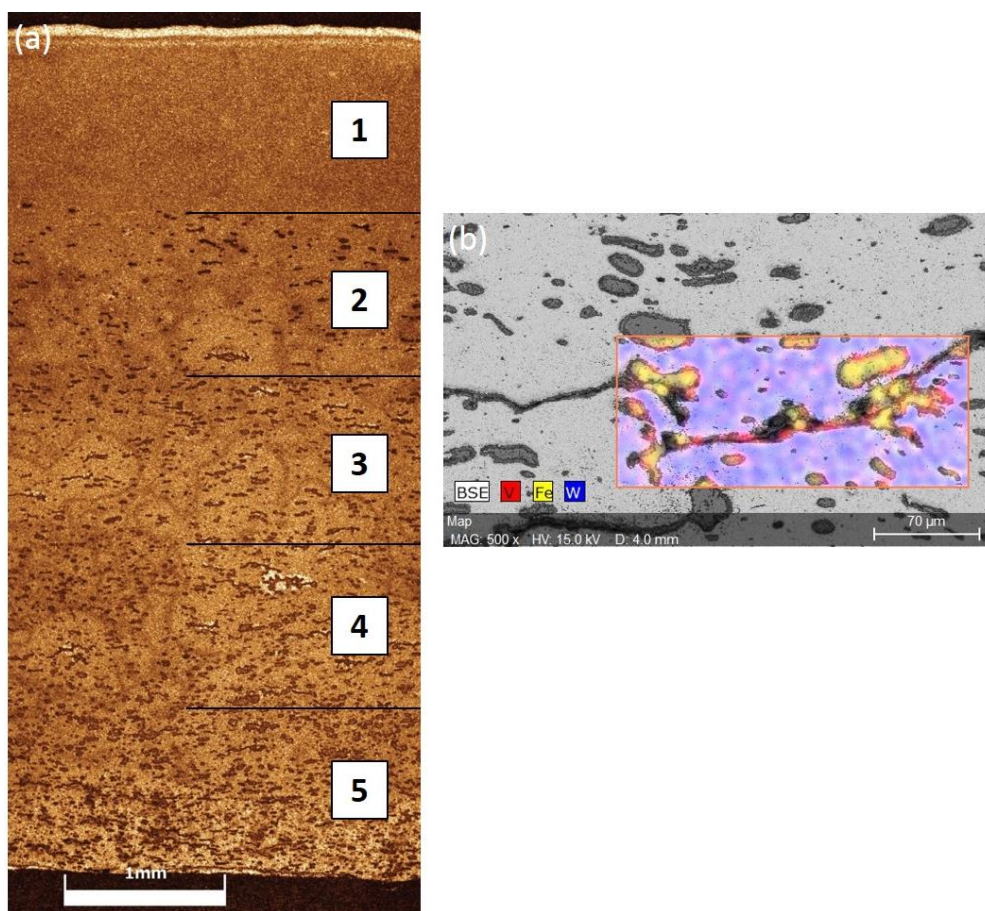


Figura 3. FGM metal duro/aço-rápido. (a) Elemento com 5 camadas; (b) EDS da fase cor preta.

Na Figura (3a) pode-se notar a presença das 5 camadas ao longo da espessura da amostra. Pela análise microscópica não se observou trincas, devido as tensões residuais de origem térmica, como citado por Ravichandran (1995). Isso significa que o projeto estrutural do elemento suportou as diferenças de propriedades físicas entre os materiais. A fase de cor preta a partir da segunda camada em concentração crescente até a quinta, diz respeito aos constituintes do aço-rápido. Na Figura (3b) tem-se a representação de uma camada do substrato contendo metal duro e aço-rápido. A análise semi-quantitativa (EDS) da região em destaque sugere que a fase cor preta contém, principalmente, Fe, que durante a sinterização/resfriamento pode estar segregando. A presença de V nas bordas desta fase também faz alusão a ferritização, que ocorre quando o teor de C é insuficiente para formar VC. Carneiro e Machado (2013) e Carneiro et al. (2013) obtiveram sucesso na gradação funcional entre cerâmica e metal duro, também reportando a ausência de trincas de origem térmica.

A Tabela (3) apresenta os resultados de densidade experimental (ρ_{exp}), teórica (ρ_{teor}) e relativa (ρ_{rel}) para as duas amostras fabricadas.

Tabela 3. Resultados de densidade.

Amostra	ρ_{exp} [g/cm ³]	ρ_{teor} [g/cm ³]	ρ_{rel} [%]
1	13,13	13,60	96,42
2	13,42	13,60	98,70

Pela tabela observa-se que o nível de porosidade obtido foi de 3,58 e 1,30% para a Amostra 1 e 2, respectivamente. Cha et al. (2003) sinterizaram por SPS pós de WC-10Co com tamanho de partícula micrométrico a 1100°C, 50 MPa e por 10 minutos na temperatura de trabalho. Os autores obtiveram completa densificação. Shi et al. (2005) sinterizaram por SPS metal duro de escala nanométrica com composição similar a um K20 a 1100°C, 50 MPa e por 10 minutos como tempo de patamar. Os autores obtiveram densidade relativa de 99,1%. Zhao et al. (2008) sinterizou por SPS pós de WC-

10Co em escala nanométrica de WC e micrométrica de Co a 1150°C, 60 MPa e por 5 e 10 minutos na temperatura de trabalho. Os autores obtiveram densidade relativa de 97 e 98%, respectivamente. Os valores obtidos experimentalmente neste trabalho estão de acordo com os da literatura, considerando que os pós WC-10Co têm quase o dobro do teor de ligante do K20 utilizado, o tempo de patamar térmico de 10 minutos foi o dobro do experimentado, além da pressão de trabalho ter sido maior. Quanto ao pó K20 utilizado por Shi et al. (2005), destaca-se o tamanho de partícula nanométrico e o tempo patamar. Portanto, os aspectos citados ajudam na densificação do sinterizado.

Todavia, o nível de porosidade obtido nas amostras fabricadas e apresentadas neste trabalho ainda está alto para a aplicação em ferramentas de corte. German (1996) cita que a densidade é uma das mais importantes variáveis no estudo da sinterização, pois ela dá informação sobre a cinética do processo e exerce grande influência em muitas propriedades do material. A Figura 4 ilustra o perfil de dureza para a Amostra 1 de FGM.

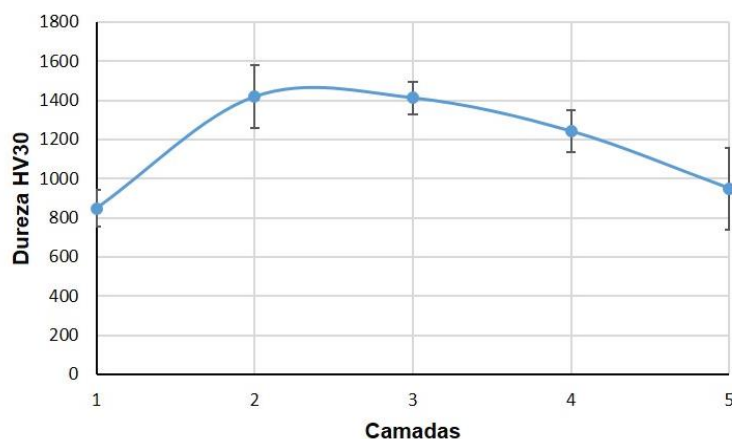


Figura 4. Perfil de dureza Vickers obtido na Amostra 1.

Observa-se que o aumento do teor de metal duro a partir da quinta camada implica em um aumento de dureza, como esperado. No entanto, a partir da segunda camada, se nota uma grande dispersão dos valores e a perda da propriedade. Durante a análise microscópica em MEV, observou-se que a porosidade na amostra estava concentrada, principalmente, na primeira camada, o que justifica o resultado de dureza. A Figura 5 evidencia os poros (pontos pretos) na primeira camada do FGM (Amostra 1). Note que a porosidade determinada de 3,58%, diz respeito a amostra como um todo. Sabendo, que essa quantidade de poros está limitada, sobretudo, na primeira camada, compreende-se ao analisar a figura que a intensidade de vazios nesta região é bastante elevada.

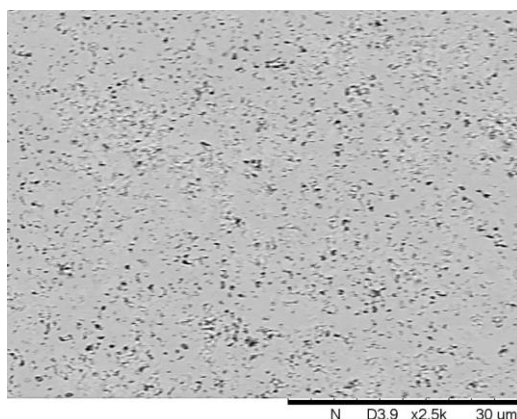


Figura 5. Micrografia evidenciado porosidade na primeira camada do FGM metal duro/aço-rápido (Amostra 1).

Constatado que a camada de metal duro ainda não estava completamente densa, a ação tomada foi de aumentar com cautela a temperatura de sinterização, pois durante o tratamento, o aço-rápido apresenta formação de fase líquida intensa, o que pode provocar a perda de material por vazamento do molde. A Figura 6 apresenta o perfil de dureza comparando as Amostras 1 e 2.

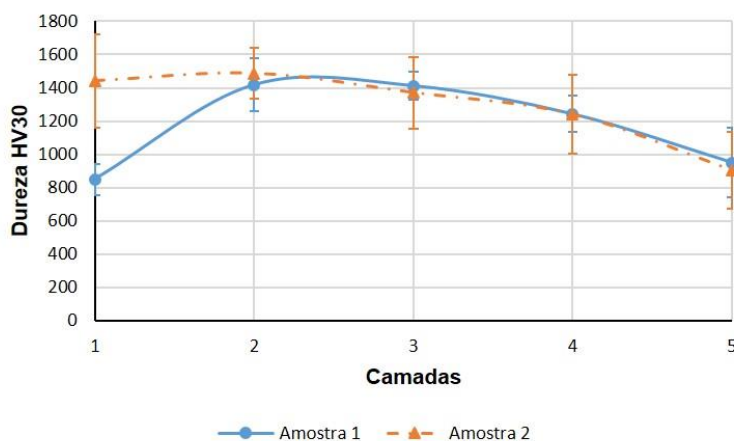


Figura 6. Comparação do perfil de dureza entre as Amostras 1 e 2 de FGM de metal duro/aço-rápido.

Embora, ainda haja porosidade de 1,30% na Amostra 2, como citado na Tab. (3), observa-se que houve um aumento de dureza na primeira camada em relação a Amostra 1 de 70%. Também, se nota, com exceção da primeira camada, que os pontos entre as duas curvas estão bem ajustados, o que indica que a técnica de sinterização SPS tem reprodutibilidade. Ao observar a microestrutura da primeira camada da Amostra 2, Fig. (7), nota-se uma significativa redução da quantidade de poros, o que ratifica o maior valor de dureza em relação a Amostra 1.

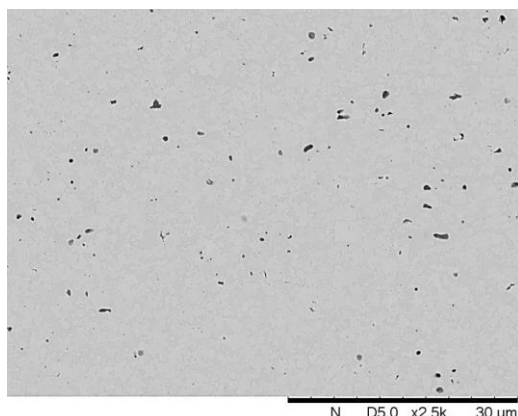


Figura 7. Micrografia evidenciando porosidade na primeira camada do FGM metal duro/aço-rápido (Amostra 2).

Dados da literatura (Upadhyaya, 2001; Carneiro, 2014) e catálogo do fabricante do pó citam que a dureza para o metal duro classe K20 é em torno de 1600 HV30. Isso significa que quando o elemento estiver denso, estima-se que a diferença de propriedade entre a primeira e a última camada seja de aproximadamente 40%. Dessa forma, espera-se obter uma peça com resistência à fratura maior do que a do metal duro homogêneo.

4. CONCLUSÕES

Os resultados de microscopia evidenciaram que o projeto estrutural do elemento suportou as tensões residuais de origem térmica provenientes da sinterização, devido à ausência de trincas na microestrutura. Por outro lado, a análise também identificou grande concentração de poros nas primeiras camadas ricas em metal duro, o que prejudicou a dureza do material (propriedade mecânica), principalmente, da Amostra 1. Como a sinterização é um tratamento térmico, verificou-se que o aumento da temperatura de trabalho, influenciou positivamente na densidade relativa e na dureza da primeira camada, que precisa ser dura para resistir ao desgaste para ter aplicação em usinagem. Finalmente, ao analisar o perfil de dureza, verificou-se a tendência de variação da propriedade ao longo da espessura das amostras, convergindo para o conceito de FGM.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (405707/2013-4; 150490/2014-3; 150188/2015-3; 800585/2016-0 e 144269/2016-3) pelo fomento à pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. ASTM C1327-08: Standard Test Method for Vickers Hardness of Advanced Ceramics. 2008. 9 p.
- Carneiro, M.B., 2014, “Fabricação de Ferramentas de Corte em Gradação Funcional por Spark Plasma Sintering (SPS)”, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 168 p.
- Carneiro, M.B.; Machado, I.F., 2013, “Sintering and Model of Thermal Residual Stress for Getting Cutting Tools from Functionally Gradient Materials”, *Procedia CIRP*, 8, pp. 199-204.
- Carneiro, M.B.; Machado, I.F.; Fredericci, C., 2013, “Desenvolvimento de Ferramenta de Corte em Gradação Funcional com Seis Camadas”, *Proceedings of 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, Penedo/RJ, Brasil.
- Cha, S.I.; Hong, S.H.; Kim, B.K., 2003, “Spark Plasma Sintering Behaviour of Nanocrystalline WC-10Co Cemented Carbide Powders”, *Materials Science and Engineering A*, 351, pp. 31-38.
- German, R.M., 1996, “Sintering Theory and Practice”, John Wiley & Sons Inc., New York, 550 p.
- German, R.M.; Park, S.J., 2008, “Handbook Mathematical Relations in Particulate Materials Processing: Ceramics, Powder Metals, Cermets, Carbides, Hard Materials, and Minerals”. John Wiley & Sons Inc., New York, 419 p.
- Gillia, O.; Caillens, B. 2010. Fabrication of a material with composition gradient for metal/ceramic assembly. *Powder Technology*. doi:10.1016/j.powtec.2010.08.029
- International Organization for Standardization. ISO 10545-3:1995/Cor.1:1997(E) Ceramic tiles – Part 3: Determination of Water Absorption, Apparent Porosity, Apparent Relative and Bulk Density.
- Kawasaki, A. and Watanabe, R., 1997, “Concept and P/M Fabrication of Functionally Gradient Materials”, *Ceramics International*, 23, pp. 79-83.
- Machado, A.R.; Abrão, A.M.; Coelho, R.T.; da Silva, M.B., 2015, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, 3a Edição, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 408 p.
- Mills, B., 1996, “Recent Developments in Cutting Tool Materials”, *J. Mat. Processing Technology*, Vol. 56, pp. 16-23.
- Mott, M. and Evans, J.R.G., 1999, “Zirconia/Alumina Functionally Graded Material Made by Ceramic Ink Jet Printing”, *Materials Science & Engineering A*, 271, pp. 344-352.
- Orrù, R.; Licheri, R.; Locci, A.M.; Cincotti, A.; Cao, G. 2009. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering. *Materials Science and Engineering R*, 63, p. 127-287.
- Ravichandran, K.S., 1995, “Thermal Residual Stresses in a Functionally Graded Material System”, *Materials Science & Engineering A*, 201, pp. 269-276.
- Shaw, M.C., 2005, “Metal Cutting Principles”, 2nd Edition, Oxford University Press, New York, 651p.
- Shi, X.L.; Shao, G.Q.; Duan, X.L.; Yuan, R.Zh.; Lin, H.H., 2005, “Mechanical properties, phases and microstructure of ultrafine hardmetals prepared by WC-6.29Co nanocrystalline composite powder”. *Materials Science and Engineering A*, 392, pp. 335-339.
- Tokita, M. 2000. Mechanism of Spark Plasma Sintering. *Proceedings of 2000 Powder Metallurgy World Congress*, Kyoto, Japan, p. 729-732.
- Upadhyaya, G.S., 2001, “Materials Science of Cemented Carbide — An Overview”. *Materials and Design*, 22, pp. 483-489.
- Watanabe, Y.; Sato, H. 2011. Review fabrication of functionally graded materials under a centrifugal force, in: *Nanocomposites with unique properties and applications in medicine and industry*, Dr. John Cuppoletti (Ed.), InTech, 2011, 360 p.
- Zhao, S.; Song, X.; Zhang, J.; Liu, X., 2008, “Effects of Scale Combination and Contact Condition of Raw Powders on SPS Sintered Near-naocrystalline WC-Co Alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 473, pp. 323-329.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DEVELOPMENT OF FUNCTIONALLY GRADED MATERIAL OF CEMENTED CARBIDE AND HIGH SPEED STEEL FOR CUTTING TOOL

Giovani Favatti Braschi, giovani.braschi@usp.br¹

José Antônio Eiras, eiras@df.ufscar.br²

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br^{3,4}

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br⁴

Marcelo Bertolete Carneiro, bertolete@sc.usp.br^{1,4}

¹School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, 13566-590, São Carlos/SP, Brazil

²Departament of Physics, Federal University of São Carlos, 13565-905, São Carlos/SP, Brazil

³Departament of Mechanical Engineering, Federal University of Espírito Santo, 29075-910, Vitória/ES, Brazil

⁴Nuclear and Energy Research Institute, Center for Laser and Applications, 05508-000, São Paulo/SP, Brazil

Abstract: Functionally Graded Material (FGM) has been considered as a new class of material, in which materials with distinct properties are united in a gradient form to produce a structural unit with non-uniform properties. The aim of this work is to present the characterization of FGM samples of cemented carbide and high-speed steel. The materials used were cemented carbide (K20) and high-speed steel (T6), which were sintered by Spark Plasma Sintering technique. The characterization was carried out from microstructure evaluation in a laser confocal microscope and scanning electron microscope, determination of relative density by Archimedes' principle and assessment of Vickers hardness along of transversal section of samples. The results showed lack of thermal cracks in the microstructure, with higher relative density value of 98.70% and hardness profile variation along of sample thickness, which highlights non-uniform properties.

Keywords: Functionally graded material, Spark plasma sintering, Cutting tool, Relative density, Vickers hardness.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.