



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO PAULO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS E MANUFATURA



DISCIPLINA SMM0319 – MATERIAIS AVANÇADOS

PROFESSORA VERA LÚCIA ARANTES

GRUPO: 4

MATERIAIS COM GRADIENTE FUNCIONAL

Nome:

Número USP:

Elisa Matalon

9313878

Gabriel Gustavo Soares Santos

10696486

Guilherme Sauchuk Sarja Diniz

9922248

Luís Felipe Roso Sordi

8549070

Laura Santos Bernard

11482451

SÃO CARLOS, SP.

AGOSTO, 2019.

1. INTRODUÇÃO

Materiais com gradiente funcional, também conhecidos por MGF's ou FGM, do inglês Functionally Graded Materials, são uma classe de materiais nos quais as propriedades mudam com a posição das partículas. O gradiente de propriedades ocorre no material devido a variação espacial da composição química, microestrutura ou ordem atômica, formando assim também uma variação das suas propriedades mecânicas, térmicas, e químicas. (KIEBACK, 2003)

Apesar de já haver proposições teóricas sobre FGMs por parte de Bever and Duwez (M.B. Bever, P.F. Duwez, Mater. Sci. Eng. 10 (1972) 1-8.) e Shen e Bever (M. Shen, M.B. Bever, J. Mater. Sci. 7 (1972) 741-746.) já em 1972, apenas a partir da década de 80 que técnicas de processamento foram desenvolvidas por um programa nacional japonês.

Os FGM foram teorizados para solucionar o problema de transição de interfaces presentes nos compósitos convencionais e que podem acarretar em falha e separação das fases em condições de operação. Os FGMs substituem transições de interfaces agudas por uma transição gradual de propriedades, o que garante maior adesão entre as camadas.

Estas propriedades são selecionadas e controladas por meio diversos métodos de manufatura permitem otimizar o desempenho para diversas aplicações como biomédica, militar, estrutural, elétrica ou térmica. Estes materiais são frequentemente usados em ferramentas de corte para obter propriedades superficiais e centrais distintas, respectivamente otimizadas para desgaste e a tenacidade máxima.

Por sua promessa de contornar os problemas presente nos compósitos, esforços foram feitos para desenvolver técnicas de manufatura que viabilizassem a produção de artefactos com FGMs, entre eles metalurgia do pó, deposição de vapor, deposição por centrifugação. (KIEBACK, 2003)

2. TIPOS

Os materiais com gradiente funcional podem ser classificados em 3 grupos; pelo gradiente de composição química, porosidade no interior do volume da peça ou microestrutura.

Os materiais com gradiente de composição química são estruturados para que no interior do seu volume, dado o método de fabricação apropriada, camadas sequenciais de materiais com composições distintas são estruturadas para, ao serem unidades, criarem fases diferentes do interior a superfície da peça. O método de metalurgia do pó é a mais comum para esse tipo de FGM.

FGMs com variação de porosidade são produzidos a partir da estruturação da peça com partículas de tamanhos e formas diferentes na estruturação das camadas da peça. Esse gradiente de porosidade também pode ser alcançado variando os parâmetros de sinterização.

As FGMs com variação de microestrutura são formadas primariamente por tratamentos térmicos ou tratamentos superficiais. (MAHAMOOD, Rasheedat Modupe; AKINLABI, Esther Titilayo. *Functionally Graded Materials*. Gewerbestrasse: Springer, 2017.)

3. APLICAÇÕES

As áreas nas quais MGF's podem ser aplicados são extremamente diversas, sendo o potencial de uso é enorme. Estes materiais já são hoje empregados nas mais diversas indústrias, como aeroespacial, automobilística, militar, de energia, nuclear, biomédica, eletroeletrônica, dentre outras áreas (BIRMAN; BYRD, 2007; MAHAMOOD; AKINLABI, 2017)

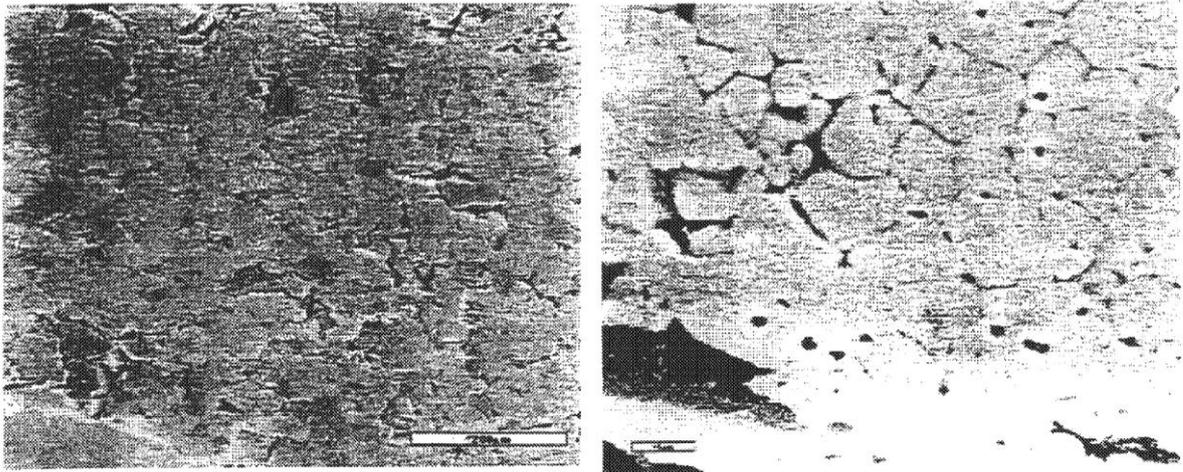
A grande vantagem desses materiais, e o que torna tão amplo o seu potencial de uso e aplicações, é a possibilidade de unir as propriedades de dois ou mais materiais, como a estabilidade térmica e química das cerâmicas e a elevada resistência mecânica dos metais – como pode se observar em projetos de pás de turbinas, mas com o diferencial de fazer isto sem apresentar uma transição brusca de fases, como ocorre nos compósitos e é prejudicial para o comportamento do material. Nos parágrafos seguintes algumas aplicações são apresentadas de forma mais detalhada (BHAVAR et.al, 2017; MAHAMOOD; AKINLABI, 2017)

3.1 Barreiras Térmicas

MGF's podem ser encontrados, por exemplo, em soluções para sistemas de revestimento como barreira térmica, do inglês *Thermal Barrier Coatings (TBC)*. Este tipo de revestimento é largamente utilizado na indústria aeroespacial, por exemplo, na fabricação de pás de turbinas, revestimento de câmaras de combustão de motores de foguetes e escudos térmicos de naves. TBC tradicionais são formados por várias camadas - *layers* - de materiais, como existe uma transição abrupta entre estas camadas, sendo assim é comum sofrerem problemas de delaminação, transferência de calor e tensões residuais. (BIRMAN; BYRD, 2007; NAEBE; SHIRVANIMOGHADDAM, 2016)

Já nos sistemas de TBC em que um gradiente funcional é empregado estes problemas são minimizados ou eliminados, já que a transição abrupta entre as camadas deixa de existir, o que melhora a transferência de energia térmica, reduz as tensões residuais e elimina o fenômeno de delaminação. A imagem abaixo mostra um exemplo de um escudo térmico que emprega a tecnologia de gradiente funcional, no caso esta foi obtida de uma patente. (BIRMAN; BYRD, 2007; BORCHERT; WILLERT-PORADA 2001; NAEBE; SHIRVANIMOGHADDAM, 2016)

Figura 1 - Visão geral e estrutura granular de um MGF de um escudo térmico após 300 h de exposição à 1200 °C sob ar atmosférico - Patentado



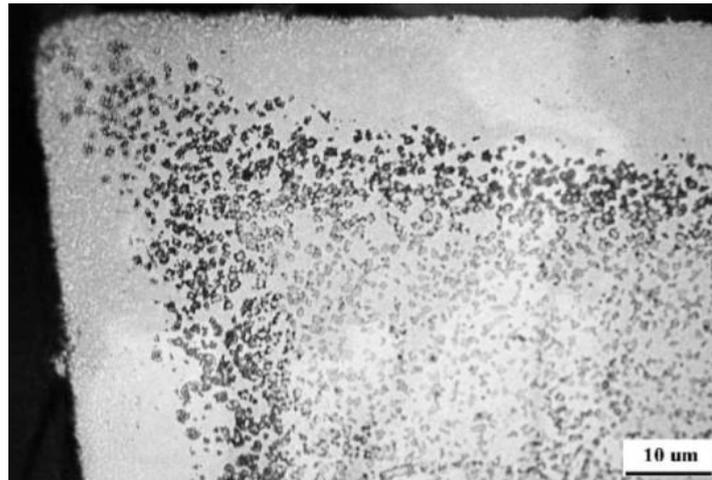
Fonte: Borchert; Willert-Porada (2001)

3.2 Ferramentas de Corte

Ferramentas de corte precisam possuir ao mesmo tempo dureza elevada, o que está diretamente relacionado ao tempo de vida e eficiência, e resistência à fratura, para garantir que ocorra falha catastrófica durante as operações, entretanto, sabe-se que essas propriedades geralmente são inversamente relacionadas, por exemplo, um aço de alta dureza tende a ter um comportamento frágil e vice versa. Nesse sentido, o uso da tecnologia de MGF's nesse tipo de ferramenta é altamente benéfico, visto que é possível construir um núcleo com boa resistência à fratura e uma superfície de alta dureza. (ARANTES et.al, 2016)

Pesquisas envolvendo o uso de Carbetto de Nióbio (NbC) e Alumina (Al_2O_3) sinterizados por meio da técnica de sinterização por plasma têm se mostrado promissoras, tendo sido alcançadas excelentes dureza, da ordem 20 à 25 GPa, e densidade, superior à 98%. Outras pesquisas têm concluído que insertos nos quais a tecnologia de gradiente funcional (GF) foi aplicada apresentam desempenho superior aos convencionais, fazendo com que seja possível usar maiores velocidades de usinagem, aumentando a produtividade sem comprometer a vida útil do inserto. A imagem abaixo mostra um exemplo deste tipo de inserto. (ARANTES et.al, 2016; CHEN et.al, 2000; CHO; PARK, 2002)

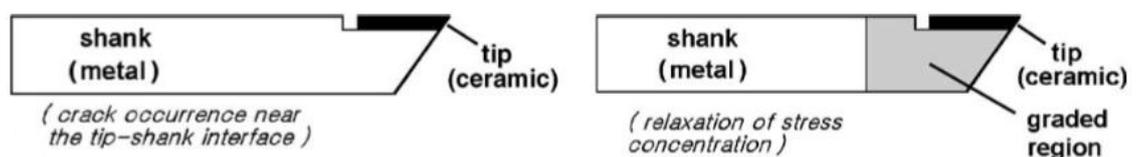
Figura 2 - Seção transversal de um inserto revestido com carbonitretos cimentados com GF



Fonte: Chen et.al (2000)

Simulações envolvendo suportes para insertos têm mostrado que é possível uma redução significativa nas microtrincas e nos concentradores de tensões dessas ferramentas, fazendo com que suportem melhor esforço termomecânico envolvido em operações de usinagem, reduzindo assim a chance de ocorrerem falhas catastróficas durante a operação. A figura abaixo esquematiza um suporte de inserto com gradiente funcional.(CHO; PARK, 2002)

Figura 3 - Comparação entre suportes para inserto, convencional à esquerda, com GF à direita



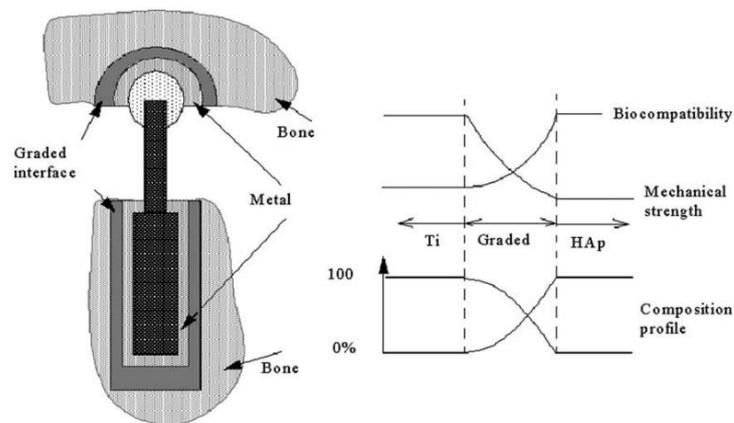
Fonte: Cho; Park (2002)

3.3 Aplicações biomédicas

Em aplicações biomédicas o benefício que o uso de MGF's pode trazer é surpreendente, em parte isso se deve ao fato do corpo possuir gradientes de forma natural, como a ligação entre tendões e ossos, os próprios ossos em si, dentes e os próprios discos intervertebrais. No caso de implantes ortopédicos, por exemplo, onde propriedades como rigidez, biocompatibilidade e desgaste são importantíssimas, MGF's são uma ótima opção,

visto que conseguem imitar melhor as propriedades mecânicas do osso se comparado a próteses de titânio, reduzindo assim problemas de descalcificação causados pelo maior módulo elástico desse tipo de prótese, além de melhorar a adesão entre a prótese e o osso, como mostrado na figura a seguir. (SOLA; BELLUCCI; CANNILLO, 2016; QIAN; DUTTA, 2004)

Figura 4 - Esquema de aplicação de MGF's em uma prótese

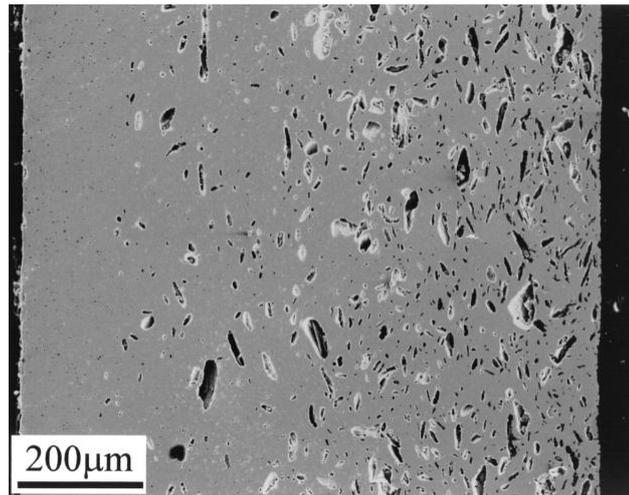


Fonte: Qian; Dutta (2004)

3.4 Atuadores e transdutores piezoelétricos

Em atuadores e transdutores piezoelétricos mais tradicionais a ligação entre as placas e os espaçadores metálicos é feita por meio de um adesivo orgânico, este tipo de configuração apresenta problemas sérios de durabilidade devido a degradação do adesivo que faz esta ligação. Estudos que desenvolveram este tipo de peça através das técnicas de *gel casting* (gelificação) e metalurgia do pó, a partir de PZT (titanato zirconato de chumbo), se mostraram bastante promissores, tendo atingido excelentes precisão dimensional e propriedades mais específicas da aplicação, como uma relação praticamente linear entre o campo elétrico induzido e a curvatura do material, além de ter contribuído para a durabilidade do sistema. A próxima figura mostra a micrografia da seção transversal de uma placa piezoelétrica com um gradiente de porosidade. (BHAVAR, 2017; GARCÍA-GANCEDO et.al, 2012; LI et.al, 2003)

Figura 5 - Microscopia eletrônica de varredura de PZT com gradiente linear de porosidade



Fonte: Li et.al (2003)

4. MÉTODOS DE FABRICAÇÃO

Materiais com gradiente funcional podem ser obtidos por meio de várias técnicas diferentes, Naebe e Shirvanimoghaddam (2016), por exemplo, as classificam em métodos baseados em gás, processos de fase líquida, processos de fase sólida e estruturas biopoliméricas com gradiente funcional.

Aqui está uma tabela resumindo o desempenho dos principais métodos.

Figura 6 - Características dos diversos processos de fabricação de MGF

Overview of processing methods for FGMs

Process	Variability of transition function	Layer thickness ^a	Versatility in phase content	Type of FGM	Versatility in component geometry
Powder stacking	Very good	M, L	Very good	Bulk	Moderate
Sheet lamination	Very good	T, M ^b	Very good	Bulk	Moderate
Wet powder spraying	Very good	UT, T ^b	Very good	Bulk ^c	Moderate
Slurry dipping	Very good	UT, T ^b	Very good	Coating	Good
Jet solidification	Very good	M, L	Very good	Bulk	Very good
Sedimentation/centrifuging	Good	C	Very good	Bulk	Poor
Filtration/slip casting	Very good	C	Very good	Bulk ^c	Good
Laser cladding	Very good	M	Very good	Bulk, coating	Very good
Thermal spraying	Very good	T	Very good	Coating, bulk	Good
Diffusion	Moderate	C	Very good	Joint, coating	Good
Directed solidification	Moderate	C	Moderate	Bulk	Poor
Electrochemical gradation	Moderate	C	Good	Bulk ^c	Good
Foaming of polymers	Moderate	C	Good	Bulk	Good
PVD, CVD	Very good	C	Very good	Coating	Moderate
GMFC process	Very good	M, L, C	Moderate	Bulk	Good

Fonte: B. Kieback a, A. Neubrand b,c,* , H. Riedel c (2002)

Certos métodos são mais adaptados para obtenção de MGF's finos e outros para volumosos. Numa ótica de resumir, todos os métodos não poderão ser apresentados.

4.1 Deposição física de vapor (PVD)

O processo ocorre em meio a vácuo e baseia-se na vaporização de um material que posteriormente será depositado na superfície a ser revestida, existem três possibilidades de vaporizar o material sólido, que modificam o processo PVD, estes são PVD por evaporação, PVD por desgaste e PVD por spray de plasma.

O processo PVD por evaporação consiste na evaporação de material por aquecimento e posteriormente vaporização utilizando uma fonte de calor adequada, por fim o material é depositado na superfície desejada. Este método tem como vantagens a facilidade do processo, sua alta taxa de deposição e a possibilidade de fabricar revestimentos ópticos e dielétricos. Como desvantagens o processo não apresenta revestimento uniforme e o revestimento depende da geometria da peça, também ocorre dificuldade em aquecer uniformemente os

materiais e a deposição pode sofrer interferência de contaminações na superfície do material alvo.

O processo PVD por desgaste depende da utilização de um gás inerte para o desgaste, os íons desse gás colidem com a superfície do material alvo, devido à alta energia cinética que o gás se encontra, a colisão resulta na expulsão por desgaste de átomos do material alvo, que atua como cátodo, estes serão depositados em um substrato desejado, que atua como ânodo. Como vantagem o processo produz uma vaporização/desgaste mais homogênea do que o processo por evaporação e possibilita a deposição em materiais com geometrias não homogêneas, além disso, a possibilidade de decomposição de materiais é muito pequena. Como desvantagens caso haja baixo desgaste ocorrerá baixa deposição de material, a composição do gás inerte tem que ser controlada para que não haja contaminação e o investimento inicial é alto.

O processo PVD por spray de plasma é um método novo que combina o baixo custo e baixa pressão da vaporização por plasma com as técnicas de deposição do PVD, esse processo permite a deposição mesmo em superfícies não uniformes. (MAHAMOOD; AKINLABI, 2017)

4.2 Deposição/infiltração química de vapor

Este método consiste em depositar uma película fina com gradiente funcional num outro material. O material a ser depositado pode ser vaporizado por aquecimento ou por diminuição da pressão abaixo da pressão de vapor de saturação do material. Este vapor é em seguida depositado no outro material por reação química num ambiente a vácuo. Este processo tem a vantagem de ser de baixo custo em energia por necessitar um vácuo de baixo nível. Ademais, este método permite deposição de camadas em materiais muito diversos, com formas complexas, e conservando um alto nível de pureza. Porém, os precursores usados podem ser caros, muito tóxicos, explosivos ou mesmo corrosivos, e o material revestido deve poder suportar altas temperaturas. (MAHAMOOD; AKINLABI, 2017)

4.3 Metalurgia do pó

Este método consiste em deposição de camadas de pós de composição diferentes numa sequência escolhida para obter um material volumoso com gradiente funcional. Esta sequência é em seguida compactada (sinterização). (ARANTES; SAKIHAMA; VLEUGELS; HUANG, 2016).

Tem vários tipos de sinterização possíveis, como prensagem a quente ou prensa isostática a quente. Porém, uma sinterização como estas pode provocar a homogeneização entre as camadas do volume de material formado, eliminando a característica gradual das propriedades do material. Uma boa solução a este problema é o uso da *sinterização por plasma por faísca, também conhecida como técnica de sinterização assistida em campo ou sinterização por corrente elétrica pulsada*. O princípio deste método é uma sinterização por compressão uniaxial a alta temperatura gerada por efeito Joule. (ERIKSSON; RADWAN; SHEN, 2013)

A forte corrente elétrica descarregada entre os pós permite zonas de alta temperatura que permite sinterização com o material amolecido ou fundido no sistema. Este processo dura pouco tempo, assim, a difusão é limitada, o tamanho de grãos controlado e o gradiente funcional conservado. (NAEBE; SHIRVANIMOGHADDAM, 2016)

4.4 Método de centrifugação

O método consiste no despejo do reforço em metal fundido, para fazer uma mistura uniforme e posteriormente do uso da força centrípeta resultante da rotação do molde que somado à diferença das densidades possibilita a fabricação de materiais com gradiente funcional, no entanto, esse método somente produz materiais cilíndricos.

Este método é dividido em duas categorias, baseadas diferença entre a temperatura da liga principal e temperatura do processo. Caso a temperatura do processo seja mais alta do que a temperatura da liga principal então o processo pode ser realizado durante a solidificação, caso contrário, a temperatura da liga principal for maior do que a temperatura do processo a segunda fase permanece sólida no molde de metal. (BHAVAR, et. al 2017; B. Kieback a, A. Neubrand b,c,* , H. Riedel c 2002)

4.5 Técnicas de Manufatura Aditiva

O processo também é conhecido como impressão 3D, esse processo monta materiais por deposição camada a camada. As vantagens deste método é a possibilidade de obtenção de materiais com formas complexas produzidos rápido e usando pouca energia.(BHAVAR, et. al 2017)

4.6 Laser metal deposition (LMD)

E uma das técnicas mais adaptadas para produzir MGF's. Ela permite a fabricação rápida (algumas horas) de materiais com formas complexas, espessos ou finos, contínuos ou descontínuos com composição variável e controlada. Um raio laser de alta energia cria uma poça de fusão num material bruto, e um outro material em pó é pulverizado na frente deste laser no nível do poço criando um depósito. Este processo de deposição tem três graus de liberdade permitindo fabricação de objetos tridimensionais.

4.7 Electron beam direct manufacturing

Este método usa feixe de elétrons como fonte de energia e fios de material bruto e, como a LMD, também é uma técnica de deposição com energia direcionada (directed energy deposition). Ele permite a fabricação de materiais médios a grandes com boas propriedades mecânicas e microestrutura continua com uma grande gama de velocidades de depósito, no entanto, que devem ser usinados e/ou serem submetidos a tratamentos térmicos.

4.8 Arc deposition Technologies

O método consiste na deposição de metal por soldagem para criar um MGF's, as soldagens utilizadas são TIG, tungsten inert gas, ou MIG, metal inert gas, ambos os sistemas utilizam alimentação por metal, e para serem melhores executadas podem ser unidas a sistemas autônomos robóticos. (BHAVAR, et. al 2017)

5. ATUALIDADES E DESAFIOS FUTUROS

Novas técnicas estão sempre sendo implementadas para a maior eficácia destes tipos de materiais, a manufatura aditiva tem sido uma das maiores ferramentas para este processo. Exemplos dessas novidades é o uso de impressões 3D no processo, a técnica de LENS (*laser engineered net shaping*), onde dentro desta pode ocorrer o incremento de ligas superficiais a laser com adição de pó (*laser surface alloying with preplaced powder*), entre outras técnicas.

O uso de impressões 3D tem sido bem aceita pois a vantagem da impressão de peças é dada em camadas então pode se definir melhor o gradiente de cada parte da peça obtendo uma maior eficiência, evoluindo em áreas como, engenharia de tecidos, diversos dispositivos eletrônicos, *soft robotics* e metamateriais de alta performance.

Entretanto um empecilho dessa técnica é que “a impressão 3D só pode imprimir peças com uma única propriedade de material ou várias propriedades discretas sem controle de gradientes mecânicos complexos” (SCIENCE ADVANCES, 03 May 2019: Vol. 5 p. 1), visto que, estes gradientes complexos ocorrem naturalmente como em nossos tendões por exemplo.

A técnica de LENS, assim como em impressão 3D, utiliza um software para moldar a peça, mas trabalha de forma parecida com o LMD, que consiste de na implementação de diferentes materiais em níveis microscópicos sendo uma ótima maneira de implementar diferentes gradientes em cada parte da peça, e com a implementação de ligas superficiais a laser com adição de pó, pode obter diferentes propriedades a cada parte distinta da peça devido aos vários tipos de ligas que podem ser formado.

Um bom exemplo é o uso na otimização do titânio, apesar do “titânio e suas ligas apresentarem alta resistência mecânica, baixa densidade, baixo módulo de elasticidade, boa biocompatibilidade e alta resistência à corrosão, motivo pelo qual são usados em diversas áreas, tais como nas indústrias aeroespacial, naval, química e na fabricação de implantes médicos” (GEETHA et al., 2009; BANERJEE et al., 2013), “O titânio e suas ligas apresentam inadequadas propriedades tribológicas, tais como alto coeficiente de atrito e baixa dureza” (TIAN et al., 2005b), o que o torna inadequado para certas aplicações. Porém com o uso desta técnica pode-se contornar isso, ponderando as propriedades o adequado para as aplicações desejadas.

Os próximos passos a serem tomados nessa área, é aprimorar o controle, precisão e conseguir chegar a níveis ainda menores de dimensionamento visando a maior eficácia e variação de propriedades em uma única peça

6. REFERÊNCIAS

ABOUDI, J.; PINDER, M. J.; ARNOLD, S. M. Higher-order theory for functionally graded materials. *Composites Part B: Engineering*, v. 30, n. 8, p. 777–832, 1999.

ARANTES, V.L. et al. Materiais com gradiente funcional a base de Al₂O₃ / NbC obtidos por sinterização assistida por corrente elétrica. 2016, Águas de Lindóia: [s.n.], 2016. p. 1629–1641. Disponível em: <<http://metallum.com.br/60cbc/anais/PDF/11-050TT.pdf>>.

ARANTES, Vera Lúcia; AGUDELO, Leonardo Grajales; DI LORENZO, Pedro Luiz. Characterization of composites based on 316 stainless steel and zirconia for use as functionally graded materials. *Materials Science Forum*, v. 802, p. 120–124, 2014.

BHAVAR, Valmik, Rkp et al. A Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 229, n. 1, 2017.

BIRMAN, Victor; BYRD, Larry W. Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures. *Applied Mechanics Reviews*, v. 60, n. 5, p. 195, 2007.

BORCHERT, Ralph; WILLERT-PORADA, Monika. METAL-CERAMIC GRADIENT MATERIAL, PRODUCT MADE FROM A METAL-CERAMIC GRADIENT MATERIAL AND PROCESS FOR PRODUCING A METAL-CERAMIC GRADIENT MATERIAL. . United States of America: [s.n.]. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/82/06/4b/ddf8f35d9b5a18/US6322897.pdf>>. , 2001.

CHEN, Limin et al. Fundamentals of liquid phase sintering for modern cermets and functionally graded cemented carbonitrides (FGCC). *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 18, n. 6, p. 307–322, 2000.

CHO, J. R.; PARK, H. J. High strength FGM cutting tools: Finite element analysis on thermoelastic characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 130–131, p. 351–356, 2002.

ERIKSSON, Mirva; RADWAN, Mohamed; SHEN, Zhijian. Spark plasma sintering of WC, cemented carbide and functional graded materials. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 36, p. 31–37, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.03.007>>.

GARCÍA-GANCEDO, L. et al. Application of gel-casting to the fabrication of 1-3 piezoelectric ceramic-polymer composites for high-frequency ultrasound devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v. 22, n. 12, 2012.

KIEBACK, B.; NEUBRAND, A.; RIEDEL, H. Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering A*, v. 362, n. 1–2, p. 81–106, 2003.

LI, Jing Feng et al. Fabrication and evaluation of porous piezoelectric ceramics and porosity-graded piezoelectric actuators. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 86, n. 7, p. 1094–1098, 2003.

MAHAMOOD, Rasheedat Modupe; AKINLABI, Esther Titilayo. *Functionally Graded Materials*. Gewerbestrasse: Springer, 2017.

NAEBE, Minoo; SHIRVANIMOGHADDAM, Kamyar. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Applied Materials Today*, v. 5, p. 223–245, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001>>.

QIAN, Xiaoping; DUTTA, Debasish. Feature-based design for heterogeneous objects. *CAD Computer Aided Design*, v. 36, n. 12, p. 1263–1278, 2004.

SOLA, Antonella; BELLUCCI, Devis; CANNILLO, Valeria. Functionally graded materials for orthopedic applications – an update on design and manufacturing. *Biotechnology Advances*, v. 34, n. 5, p. 504–531, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.013>>.

XING, Ai et al. Development of an advanced ceramic tool material - Functionally gradient cutting ceramics. *Materials Science and Engineering A*, v. 248, n. 1–2, p. 125–131, 1998.

ZHU, Jingchuan *et al.* Fabrication of ZrO₂-NiCr functionally graded material by powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*, v. 68, n. 1–3, p. 130–135, 2001.

Hofmeister, W.; Wert, M.; Smugeresky, J.; Philliber, J. A.; Griffith, M.; Ensz, M. *Investigating Solidification with the Laser-engineered Net Shaping (LENSTM) Process*. *JOM* **1999**, 51 (7).

UNICAMP, Edwin Sallica Leva, *Modificação superficial a laser para obtenção de gradientes de dureza e módulo de elasticidade em titânio*. Disponível em: <file:///C:/Users/felli/Documents/SallicaLeva_Edwin_D.pdf>

SCIENCE ADVANCES, Xiao Kuang, Jiangtao Wu, *Grayscale digital light processing 3D printing for highly functionally graded materials*. Disponível em: <<https://advances.sciencemag.org/content/5/5/eaav5790.full>>