

# Avaliação do desempenho mecânico e análise microestrutural de revestimentos avançados de barreira térmica produzidos por aspersão térmica para aplicações aeroespaciais

Bianca Costa Rodrigues<sup>1</sup>   
Vera Lúcia de Óthero Brito<sup>2</sup>   
Leonardo Henrique Fazan<sup>1</sup>   
Cauã Willian de Souza Barbosa<sup>2</sup>   
Renata Jesuina Takahashi<sup>1</sup>   
Danieli Aparecida Pereira Reis<sup>1\*</sup> 

## Resumo

Os revestimentos de barreira térmica (TBCs) são essenciais na indústria aeronáutica para proteger componentes de turbinas a gás contra altas temperaturas. Em sua composição, possuem uma camada cerâmica isolante (*top coat*), uma camada de óxido termicamente crescido (TGO) e uma camada metálica de ligação (*bond coat*), cuja aderência e resistência são influenciadas pelo processo de deposição. Neste sentido, este estudo comparou a microestrutura e propriedades mecânicas de TBCs cujos *bond coats* foram produzidos por aspersão térmica a plasma (APS) e por aspersão térmica a chama de alta velocidade (HVOF) sobre substrato de Ti-6Al-4V. Foram realizadas análises de microscopia óptica, indentação instrumentada para determinação de dureza e módulo de elasticidade, e medições de rugosidade superficial. Os resultados indicaram que o *bond coat* aplicado por HVOF apresentou melhor uniformidade e maior dureza ( $3,63 \pm 0,74$ ) GPa em comparação ao aplicado por APS ( $2,34 \pm 0,85$ ) GPa. Além disso, o *top coat* da amostra com *bond coat* por HVOF apresentou menor rugosidade, resultado da maior intensidade de corrente e melhor fusão das partículas. Portanto, a combinação de *bond coat* por HVOF e *top coat* por APS com maior corrente demonstrou alto potencial para aplicação em componentes aeronáuticos.

**Palavras-chave:** TBC; Aspersão por Plasma; HVOF; Ti-6Al-4V.

## Evaluation of mechanical behaviour and microstructural analysis of advanced thermal barrier coatings produced by thermal spraying for aerospace applications

## Abstract

Thermal Barrier Coatings (TBCs) are essential in the aeronautical industry to protect gas turbine components from high temperatures. In their composition, they have an insulating ceramic layer (*top coat*), an thermally grown oxide layer (TGO), and a metallic bond layer (*bond coat*), whose adhesion and strength are influenced by the deposition process. In this context, this study compared the microstructure and mechanical properties of TBCs with bond coats produced by Atmospheric Plasma Spray (APS) and High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) on a Ti-6Al-4V substrate. Analyses were conducted using optical microscopy, instrumented indentation to determine hardness and elastic modulus, and surface roughness measurements. The results indicated that the bond coat applied by HVOF exhibited better uniformity and higher hardness ( $3.63 \pm 0.74$ ) GPa compared to the one applied by APS ( $2.34 \pm 0.85$ ) GPa. Additionally, the top coat of the sample with the HVOF bond coat exhibited lower roughness due to higher applied current intensity and better particle fusion. Therefore, the combination of an HVOF bond coat and an APS top coat with higher current intensity demonstrated high potential for application in aeronautical components.

**Keywords:** TBC; Plasma Spraying; HVOF; Ti-6Al-4V.

<sup>1</sup>Laboratório de Comportamento Mecânico de Metais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>2</sup>Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA, Instituto de Estudos Avançados – IEAv, São José dos Campos, SP, Brasil.

\*Autor correspondente: danieli.reis@unifesp.br

E-mails: bianca.costa@unifesp.br; veravlob@fab.mil.br; leonardo.fazan@unifesp.br; caua.william25@gmail.com; renata.takahashi@unifesp.br



## 1 Introdução

Os sistemas de revestimentos cerâmicos refratários conhecidos como *Thermal Barrier Coatings* (TBCs) são amplamente utilizados na indústria aeronáutica para aumentar a durabilidade e eficiência dos componentes sujeitos a elevadas temperaturas, como palhetas e câmaras de combustão de turbinas a gás [1]. Esses revestimentos são compostos por uma camada cerâmica isolante (*top coat*), uma camada metálica de ligação (*bond coat*) e uma camada intermediária de óxidos crescidos termicamente (*Thermally Grown Oxide* – TGO), que influencia a aderência entre as camadas e a resistência à oxidação [2-4].

A camada de ligação dos TBCs é composta por revestimentos que incluem elementos como Cromo (Cr), Alumínio (Al) e um elemento de terra rara, como o Ítrio (Y), formando a base da sua composição química, denominada genericamente MCrAlY. O elemento M pode ser níquel (Ni), cobalto (Co), ferro (Fe) ou uma combinação desses metais [5]. O *bond coat* deve apresentar um elevado teor de alumínio, servindo como um reservatório para a formação de óxido de alumínio ao longo do tempo [6]. A TGO, por sua vez, é principalmente composta pelos óxidos de alumínio e ítrio, garantindo a proteção do substrato contra a oxidação [7]. Além disso, os TBCs empregados atualmente são revestidos por uma camada cerâmica de zircônia ( $ZrO_2$ ) estabilizada com 6 a 8% de ítria ( $Y_2O_3$ ), denominada YSZ (*Yttria Stabilized Zirconia*) [8].

De maneira geral, as técnicas de deposição das camadas estão diretamente associadas à aplicação e às propriedades finais que se deseja obter do revestimento. Para aplicação do *bond coat*, a técnica utilizada impacta diretamente a aderência, resistência mecânica e microestrutura do revestimento [9,10]. Dentre as principais abordagens para essa aplicação estão a aspersão térmica a plasma (*Atmospheric Plasma Spray* – APS), ideal para componente maiores como turbinas estacionárias e câmaras de combustão, e a aspersão térmica a chama de alta velocidade (*High Velocity Oxy-Fuel* – HVOF), mais indicada para peças que requerem excelente proteção contra corrosão [11-14].

A aspersão por plasma (APS) utiliza um pó aquecido em uma tocha a plasma, onde partículas fundidas são aceleradas por um gás ionizado e depositadas no substrato, formando um revestimento poroso [4]. Pode ser realizada em atmosfera aberta, de baixa pressão ou vácuo, e é ideal para revestimentos térmicos devido à sua capacidade de proteger o substrato [15]. Por sua vez, a aspersão a chama de alta velocidade (HVOF) envolve a queima de combustível com oxigênio para gerar um jato de alta velocidade que aquece e acelera o pó, depositando-o no substrato [5]. Essa técnica produz revestimentos com alta aderência, espessuras de 100 a 300  $\mu m$  e baixa porosidade, sendo eficaz para obter camadas de alta resistência mecânica e boa adesão [16].

Dado o impacto dos TBCs e a importância da escolha da técnica de produção, este estudo teve como objetivo comparar as propriedades microestruturais e mecânicas

de TBCs com *bond coats* aplicados por APS e HVOF em substrato de Ti-6Al-4V. A partir das análises realizadas, buscou-se identificar a configuração mais adequada para aplicações aeronáuticas, considerando fatores como adesão, resistência mecânica e potencial de delaminação, além de contribuir com os projetos da FAB (Força Aérea Brasileira) e com o desenvolvimento de TBCs fabricados no Brasil.

## 2 Materiais e métodos

Neste trabalho, foram utilizados substratos cilíndricos de Ti-6Al-4V com diâmetro de 11 mm e espessura de 7 mm. Os revestimentos foram aplicados na empresa Alpha Metalização, localizada na cidade de Barueri, no Estado de São Paulo.

Para a produção das camadas do TBC foram utilizados os pós da fabricante Höganäs. Para o *bond coat* utilizou o pó de NiCrAlY (Amperit 413.001) com tamanho de partícula entre 45-22  $\mu m$  e composição química de 66,1-65,8% Ni, 11% Al, 22% Cr, 0,9-1,2% Y. Para o *top coat* de zircônia estabilizada com ítria (YSZ), foi empregado o pó Amperit 831.054, com tamanho de partícula entre 10 e 45  $\mu m$ . O *bond coat* foi aplicado por duas técnicas distintas:

- **APS:** aplicação realizada com equipamento Praxair Miller Thermal SG-100 e alimentador de pó Miller Thermal 1270, utilizando uma mistura de Ar-He como gás plasmogênico.
- **HVOF:** aplicada com equipamento TAFA JP-5000, utilizando querosene como combustível e oxigênio como comburente. O alimentador de pó foi o Oerlikon Metco 5MP-HP e o gás de arraste utilizado foi nitrogênio.

Em ambas as configurações, o *top coat* de YSZ foi depositado por APS. Na deposição, houve variação de corrente, sendo de 900 A nas amostras com *bond coat* depositado por HVOF e de 700 A nas amostras com *bond coat* depositado por APS.

Para realizar as análises no TBC, foi necessário a preparação metalográfica das amostras. Inicialmente, as amostras foram cortadas transversalmente em uma cortadeira Minitom (Struers) com disco de diamante, operando entre 150-200 rpm e carga de 250-300 N. Em seguida, foram embutidas a quente com aproximadamente 15 g de baquelite (Arotec-Pre 30 MI). O lixamento foi realizado em politriz semiautomática (Aropol VV-PUR, Arotec) a 300 rpm, utilizando lixas #800 e #1200. O polimento foi realizado com pano PP NAP, sílica coloidal e água destilada. Após limpeza e secagem, a microestrutura foi revelada por ataque químico com reagente Kroll (3 mL de ácido fluorídrico, 6 mL de ácido nítrico e 100 mL de água). Por fim, a caracterização dos revestimentos aplicados foi realizada por meio de análises de microscopia óptica, medição de espessura, indentação instrumentada e avaliação da rugosidade superficial.

## 2.1 Análise por microscopia óptica (MO) e medição de espessura

A análise microestrutural das amostras foi realizada por microscopia óptica utilizando os microscópios Opton TNM-07T-PL e Olympus BX53M. O objetivo foi avaliar a qualidade das camadas depositadas, suas interfaces e a integridade estrutural do revestimento.

Além disso, a espessura das camadas foi medida por meio do *software* ImageJ. Após a importação e calibração das micrografias, identificaram-se as regiões de interesse e utilizou-se a ferramenta de linha para medir a distância entre as interfaces superior e inferior da camada de revestimento. A média e o desvio padrão foram calculados com base em cinco medições para garantir precisão na análise.

## 2.2 Ensaio de indentação instrumentada

A microdureza e o módulo de elasticidade foram determinados por indentação instrumentada usando um equipamento Anton Paar. O ensaio utilizou um indentador Vickers (V-J09) com aquisição de dados a 10 Hz e sensor Dz para precisão. Aplicou-se carga de 200 mN no *bond coat* e substrato metálico e 300 mN no *top coat*, com taxas de carga e descarga de 600 mN/min.

O contato inicial foi de 10 mN, com velocidades de aproximação e retração de 4000 nm/min e 8000 nm/min, respectivamente. O limiar de rigidez foi fixado em 5000  $\mu\text{N}/\mu\text{m}$  para avaliar a resposta do material.

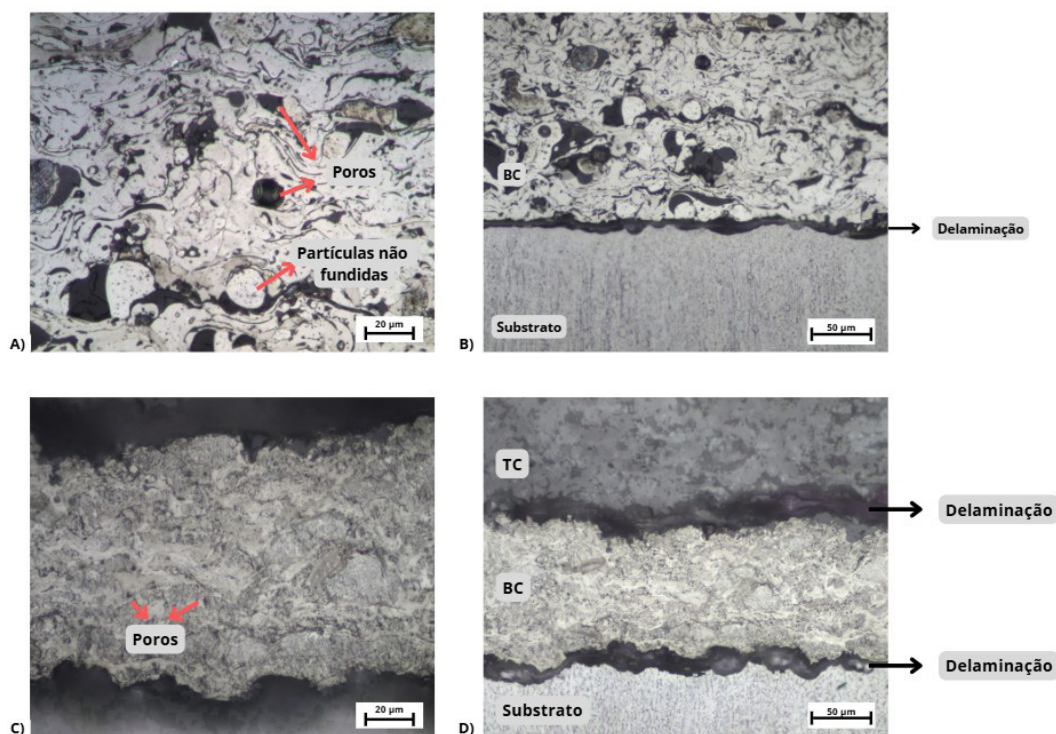
## 2.3 Ensaio de rugosidade superficial

A rugosidade superficial foi medida com um rugosímetro Mitutoyo SJ-210, seguindo a norma ISO-1997 e utilizando o filtro Gauss. Foram avaliados os parâmetros Ra, Rq e Rz no *top coat* das amostras com *bond coat* obtidos pelas técnicas APS e HVOF. Cada amostra passou por cinco medições para maior precisão dos resultados.

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Microestrutura e espessura das camadas

A análise microestrutural dos TBCs revelou diferenças significativas entre os processos de aspersão térmica por APS e HVOF. No revestimento com *bond coat* aspergido por plasma (Figura 1A), observou-se a presença de poros, característica comum dessa técnica, além de partículas não fundidas, o que pode comprometer a adesão e a coesão do revestimento [15,17]. As tensões residuais, geradas pelo rápido resfriamento das gotículas fundidas sobre o substrato frio, formam um estresse de tração, levando à formação de microtrincas, que afetam a integridade e durabilidade do revestimento [18,19]. A interação dessas tensões com ciclos térmicos pode ativar mecanismos inelásticos, acelerando a fratura e a delaminação, como evidenciado na Figura 1B. Já no revestimento com *bond coat* aspergido por HVOF, a camada de *bond coat* apresentou maior uniformidade e



**Figura 1.** Micrografia da seção transversal dos revestimentos por microscopia óptica: (A) BC por APS; (B) interface entre o BC por APS com o substrato; (C) BC por HVOF e (D) interfaces entre o BC por HVOF com o TC o substrato.



menor porosidade (Figura 1C), embora ainda com algumas pequenas imperfeições. Neste caso, há a formação de tensões residuais compressivas, devido à alta velocidade de impacto das partículas [20], entretanto a delaminação entre as camadas também foi observada (Figura 1D).

A Tabela 1 apresenta as medições das espessuras das camadas de *bond coat* e *top coat* aspergidas por APS e por HVOF.

Analisando a espessura das camadas, os revestimentos com *bond coat* aspergido por APS apresentaram uma espessura de  $(275 \pm 28) \mu\text{m}$ , superior ao intervalo recomendado de 60-160  $\mu\text{m}$  por Limar [8], enquanto o *bond coat* aspergido por HVOF ( $127 \pm 11 \mu\text{m}$ ) ficou dentro dessa faixa esperada. A espessura do TC obtido em ambas as amostras ficou acima da faixa típica de 130-380  $\mu\text{m}$  apresentada por Hardwicke e Lau [21], o que pode ter contribuído para a formação de trincas, como evidenciado na Figura 2, justamente devido ao aumento das tensões residuais. A espessura das camadas é crucial para a resistência térmica e a adesão do revestimento. Valores excessivos podem aumentar o risco de delaminação e comprometer a performance do TBC, como observado nas trincas formadas no TC, especialmente quando a espessura excede os limites recomendados [22].

### 3.2 Dureza e módulo de elasticidade

A dureza e o módulo de elasticidade são propriedades chave para o desempenho dos TBCs, dado que são influenciadas pela microestrutura, rugosidade e porosidade [23,24]. Pelo ensaio de indentação instrumentada, obteve-se os valores de microdureza, como mostrado na Tabela 2. Observou-se que o *top coat* apresentou valores de dureza Martens semelhantes nas amostras com BC produzidos por APS e HVOF, com resultados de 4,55 GPa e 4,00 GPa, respectivamente, o que já era esperado dado o TC ter sido depositado em ambas as amostras pela técnica de APS.

A pequena diferença entre os valores pode ser explicada pela variação nos próprios parâmetros do processo de deposição, como a intensidade da corrente utilizada no plasma, que pode influenciar a densidade e a porosidade da camada [24]. O maior desvio-padrão observado no TC indica a presença de defeitos, como a porosidade, que podem afetar os resultados de dureza [25]. Adicionalmente, foi observada uma diferença mais pronunciada na dureza do *bond coat*, com o revestimento obtido por HVOF apresentando dureza superior (3,63 GPa) em comparação ao aplicado por APS (2,34 GPa). A maior dureza do BC gerado por HVOF pode estar relacionada à sua menor porosidade e maior densidade, como corroborado por Kucuk *et al.* [26], que observaram maior dureza em camadas de YSZ com menor porosidade, e por Lavasani *et al.* [27], que também relataram valores superiores para revestimentos mais densos.

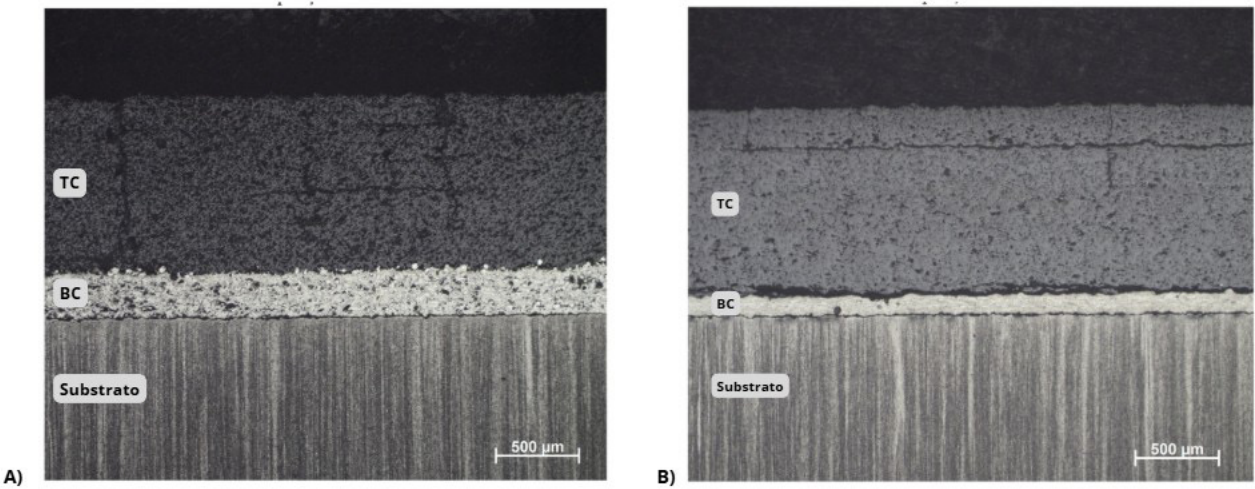
O módulo de elasticidade das camadas do TBC, mostrado na Tabela 3, apresentou um comportamento

**Tabela 1.** Medições da espessura das camadas de *bond coat* e *top coat* depositadas por APS e HVOF

| Camada           | BC por APS<br>[ $\mu\text{m}$ ] | BC por HVOF<br>[ $\mu\text{m}$ ] |
|------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| <i>Bond coat</i> | $275 \pm 28$                    | $127 \pm 11$                     |
| <i>Top coat</i>  | $1063 \pm 35$                   | $1117 \pm 16$                    |

**Tabela 2.** Medidas da microdureza das camadas do TBC aspergidas por APS e HVOF

| Camada                  | Microdureza<br>BC por APS<br>[GPa] | Microdureza<br>BC por HVOF<br>[GPa] |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Top coat</i> por APS | $4,55 \pm 1,78$                    | $4,00 \pm 1,27$                     |
| <i>Bond coat</i>        | $2,34 \pm 0,85$                    | $3,63 \pm 0,74$                     |
| Substrato               | $3,12 \pm 0,47$                    | $3,34 \pm 0,41$                     |



**Figura 2.** Macrografias com ampliação de 50x: (A) camadas do TBC com BC aspergido por plasma e substrato de Ti-6Al-4V; (B) camadas do TBC com BC aspergido por HVOF e substrato de Ti-6Al-4V.

semelhante ao observado para a dureza. A camada cerâmica depositada por APS nas duas amostras apresentou módulos elásticos próximos. Ao analisar os módulos elásticos dos BCs, pode-se notar uma diferença entre eles, com o revestimento por APS apresentando  $(139 \pm 28)$  GPa, enquanto o por HVOF foi de  $(123 \pm 15)$  GPa. Esses valores estão dentro da faixa esperada para materiais cerâmicos como a zircônia estabilizada com ítria (YSZ), cujos módulos variam entre 20 e 100 GPa, conforme reportado por Wallace e Ilavsky [28]. A diferença observada no módulo de elasticidade pode ser explicada pela variabilidade na porosidade das camadas, que reduz o módulo elástico conforme aumenta a porosidade [28]. Isso reflete a importância da análise da microestrutura, especialmente da porosidade, na escolha da técnica de aplicação dos TBCs.

Em relação ao substrato, os valores de dureza e módulo elástico foram muito próximos entre as amostras, indicando que o Ti-6Al-4V não foi significativamente afetado pelos métodos de deposição da camada de ligação.

### 3.3 Rugosidade superficial

As médias e desvios-padrão dos parâmetros de rugosidade superficial (Ra, Rq e Rz) para os *top coats* com *bond coat* aplicados por APS e por HVOF estão apresentados na Tabela 4.

Os resultados indicaram que a amostra com BC produzido por APS apresentou maior rugosidade em comparação à amostra com BC depositado por HVOF em todos os parâmetros analisados. A diferença observada pode ser explicada pela intensidade da corrente utilizada nos dois processos: enquanto a corrente foi de 900 A para o HVOF, para o APS foi de 700 A.

A corrente mais baixa no APS resulta em menor energia térmica disponível para fundir as partículas, o que leva a uma camada de revestimento mais rugosa, com partículas parcialmente fundidas, conforme evidenciado pelas micrografias (Figura 1) [15].

Esses resultados são consistentes com outros estudos encontrados por Beele et al. [29], que também observaram maior rugosidade superficial em revestimentos aplicados por APS [29].

Estudos realizados por Nicholls et al. [30] encontraram um valor médio do Ra em torno de  $10 \mu\text{m}$  para TBCs aplicados por APS. Ao comparar com os resultados obtidos neste estudo, observa-se que amostras apresentaram rugosidades inferiores ( $\text{Ra} = 4,6 \mu\text{m}$  para APS aplicado com corrente de 700 A e  $\text{Ra} = 3,5 \mu\text{m}$  para APS aplicado com corrente de 900 A), indicando camadas mais suaves. Essa redução na rugosidade pode estar associada ao uso, neste estudo, de pó de zircônia com partículas esféricas ocas (*hollow spheres*) e granulometria relativamente pequena. Esse tipo de partícula favorece a formação de lamelas mais finas e bem distribuídas, contribuindo para um revestimento mais homogêneo e menos rugoso [31,32].

**Tabela 3.** Medidas do módulo elástico das camadas do TBC aspergidas por APS e HVOF

| Camada                  | Módulo Elástico<br>BC por APS<br>[GPa] | Módulo Elástico<br>BC por HVOF<br>[GPa] |
|-------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| <i>Top coat por APS</i> | $(134 \pm 40)$                         | $(114 \pm 26)$                          |
| <i>Bond coat</i>        | $(139 \pm 28)$                         | $(123 \pm 15)$                          |
| <b>Substrato</b>        | $(143 \pm 10)$                         | $(149 \pm 13)$                          |

**Tabela 4.** Medidas da rugosidade superficial do TC das amostras com BC aspergidas por APS e por HVOF.

| Amostra             | Ra<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Rq<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Rz<br>[ $\mu\text{m}$ ] |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| TBC com BC por APS  | $4,63 \pm 0,16$         | $5,82 \pm 0,11$         | $26,34 \pm 1,19$        |
| TBC com BC por HVOF | $3,65 \pm 0,25$         | $4,54 \pm 0,25$         | $21,34 \pm 0,80$        |

Além disso, as medições do parâmetro Rq, que é mais sensível a picos e vales, confirmaram que a amostra com BC por APS tem uma superfície mais irregular, com desvios mais acentuados em relação à linha média. Isso sugere que a amostra com BC por APS pode ter maior influência de tensões residuais, o que, em ciclos térmicos, pode comprometer a durabilidade do revestimento [19]. Quanto ao parâmetro Rz, as alturas máximas de rugosidade da amostra com BC por APS foram significativamente maiores, indicando picos mais acentuados e uma superfície mais irregular. Em contraste, a amostra com BC por HVOF apresentou uma superfície mais regular e suave.

Embora uma rugosidade maior possa ser benéfica para a adesão entre as camadas, ela também pode aumentar as tensões térmicas e comprometer a durabilidade do revestimento [33]. Para aplicações em turbinas, por exemplo, uma técnica que produza camadas com menor rugosidade pode ser vantajosa, já que uma superfície mais lisa pode reduzir a temperatura na superfície e diminuir as perdas aerodinâmicas [34].

## 4 Conclusões

Este estudo abordou a comparação entre TBCs com bond coats produzidos por aspersão por plasma (APS) e por chama de alta velocidade (HVOF), com foco na análise da microestrutura, rugosidade e propriedades mecânicas dos revestimentos térmicos, especialmente dureza e módulo elástico. Os resultados mostraram diferenças significativas entre os revestimentos, que podem ser atribuídas às particularidades de cada processos e pôde-se concluir que:

- TBCs com *bond coat* aspergidos por APS apresentaram mais defeitos (trincas e partículas não fundidas) do que os depositados por HVOF, devido à maior velocidade das partículas no processo HVOF que resultou em uma microestrutura mais homogênea.

- As espessuras dos *top coats* foram similares (diferença de 5,1%), mas a espessura dos *bond coats* foi significativamente maior na amostra aspergida por APS (275  $\mu\text{m}$ ) quando comparado ao HVOF (127  $\mu\text{m}$ ), o que pode influenciar na adesão e resistência ao desgaste.
- O *top coat* da amostra com *bond coat* aspergido por HVOF apresentou menor rugosidade (3,65  $\mu\text{m}$ ) do que o por APS (4,63  $\mu\text{m}$ ), devido à diferença de corrente aplicada e, conseqüentemente, fusão das partículas. Observou-se que uma maior corrente, resulta em uma menor rugosidade.
- O *bond coat* por HVOF foi 55,1% mais duro que o por APS, devido à maior densidade e menor porosidade do revestimento produzido por HVOF.
- O módulo elástico do *bond coat* por APS foi ligeiramente superior (139 GPa) ao do HVOF

(123 GPa), refletindo as diferenças nas propriedades mecânicas dos revestimentos.

Dessa maneira, a comparação entre as técnicas e parâmetros de aspersão estudados neste trabalho indicou que o HVOF proporciona um *bond coat* mais denso e resistente mecanicamente, enquanto o APS com maior intensidade de corrente resulta em uma interface mais rugosa. Para aplicações aeronáuticas, a combinação de *bond coat* aspergido por HVOF com *top coat* aspergido por APS de maior intensidade de corrente mostrou-se a mais promissora, unindo resistência mecânica e isolamento térmico. Contudo, o controle das tensões residuais e a otimização dos parâmetros de deposição são essenciais para evitar falhas prematuras.

### Agradecimentos

CNPq, Capes, FAPESP, FINEP, Laboratório de Comportamento Mecânico de Metais, Instituto de Estudos Avançados – IEAv/DCTA e Alpha Metalização.

### Referências

- 1 Zhou Y, Luo F, Zhou Y, Nan H, Zhang Q, Wang C, et al. Plasma sprayed TBCs with controlled intra-splat spherical pores and enhanced blocking of radiative heat transfer. *Journal of the European Ceramic Society*. 2023;44(5):3099-3111.
- 2 Stöver D, Funke C. Directions of the development of thermal barrier coatings in energy applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999;92:195-202.
- 3 Lima CRC, Trevisan RE. Aspersão térmica: fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora; 2007.
- 4 Almeida DS. Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe elétrons para aplicação como barreira térmica [tese]. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE; 2005.
- 5 Volú RM. Estudo do Efeito do Tratamento Térmico Realizado com Laser de CO<sub>2</sub> em Aço 316 Previamente Revestido com NiCrAlY aplicado por HVOF. In: Pereira AIA, organizador. Estudos interdisciplinares: ciências exatas e da terra e engenharias 3. Ponta Grossa: Atena Editora; 2019. Cap. 10, p. 92-99.
- 6 Lau H, Leyens C, Schulz U, Friedrich C. Influence of bondcoat pre-treatment and surface topology on the lifetime of EB-PVD TBCs. *Surface and Coatings Technology*. 2003;165(3):217-223.
- 7 Takahashi RJ, Assis JMK, Piorino Neto F, Reis DAP. Thermal conductivity study of ZrO<sub>2</sub>-YO<sub>1</sub>. 5-NbO<sub>2</sub>. 5 TBC. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:4932-4938.
- 8 Limar CRC. Revestimentos para barreira térmica: evolução e perspectivas. *Soldagem e Inspeção*. 2014;19:353-363.
- 9 Park JH, Kim JS, Lee KH, Song YS, Kang MCK. Effects of the laser treatment and thermal oxidation behavior of CoNiCrAlY/ZrO<sub>2</sub>-8 wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coating. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;201(1-3):331-335.
- 10 Lima CRC, Guilemany JM. Adhesion improvements of Thermal Barrier Coatings with HVOF thermally sprayed bond coats. *Surface and Coatings Technology*. 2007;201(8):4694-4701.
- 11 Reddy M, Prasad CD, Patil P, Ramesh MR, Rao N. Hot corrosion behavior of plasma-sprayed NiCrAlY/TiO<sub>2</sub> and NiCrAlY/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ cermets coatings on alloy steel. *Surfaces and Interfaces*. 2021;22:100810.
- 12 Oliveira JP, Duarte JF. Revestimentos cerâmicos utilizados como barreira térmica. *Cerâmica*. 2013;59:186-191.
- 13 Bach W, Engl L, Bach C, Lugscheider E, Parco M, Duda T. Evaluation of modern HVOF systems concerning the application of hot corrosion protective coatings. In: Moreau C, Marple B, editors. *Thermal Spray 2003: advancing the science and applying the technology*. Materials Park, OH: ASM international; 2003. p. 519-527.
- 14 Wielage B, Wank A, Pokhmurska H, Grund T, Rupprecht C, Reisel G, et al. Development and trends in HVOF spraying technology. *Surface and Coatings Technology*. 2006;201(5):2032-2037.

- 15 Martins RF. Estudo sobre o ataque dos silicatos fundidos (CMAS) a revestimentos para barreira térmica (TBC) depositados por aspersão térmica [dissertação]. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie; 2023.
- 16 Pawlowski L. The science and engineering of Thermal Spray Coatings. 2nd ed. England: John Wiley e Sons, Ltd Publishing; 2008.
- 17 Paredes RSC. Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção de aço contra a corrosão marinha [tese]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 1998.
- 18 Zeng S, Liu Y, Fan X, Huang W, Gu L, Zou B, et al. Thermal shock resistance of APS 8YSZ thermal barrier coatings on titanium alloy. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2012;21:335-343.
- 19 Evans AG, Clarke DR, Levi CG. The influence of oxides on the performance of advanced gas turbines. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008;28:1405-1419.
- 20 Sobolev VV, Guilemany JM, Nutting J. High velocity oxy-fuel spraying: theory, structure-property relationships and applications. London, UK: Maney Publishing; 2004. 397 p.
- 21 Hardwicke CU, Lau YC. Advances in Thermal Spray Coatings for Gas Turbines and Energy Generation: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013;22(5):564-576.
- 22 Zhang J, Desai V. Evaluation of thickness, porosity and pore shape of plasma sprayed TBC by electrochemical impedance spectroscopy. *Surface and Coatings Technology*. 2005;190(1):98-109.
- 23 Guo S, Kagawa Y. Effect of thermal exposure on hardness and Young's modulus of EB-PVD yttria-partially-stabilized zirconia thermal barrier coatings. *Ceramics International*. 2006;32(3):263-270.
- 24 Duan K, Steinbrech RW. Influence of sample deformation and porosity on mechanical properties by instrumented microindentation technique. *Journal of the European Ceramic Society*. 1998;18(2):87-93.
- 25 Freitas FE. Comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V com recobrimento como forma de barreira térmica (TBC) depositado por aspersão térmica seguido de refusão por laser [tese]. São José dos Campos: Universidade Federal de São Paulo - Unifesp; 2020.
- 26 Kucuk A, Berndt CC, Senturk U, Lima RS, Lima CRC. Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. I: Four point bend test. *Materials Science and Engineering A*. 2000;284(1-2):29-40.
- 27 Lavasani H, Qazi, Valefi Z, Ehsani N, Masoule S, Tomaddon. Comparison of the effect of sintering on the microstructure, micro hardness and phase composition of conventional and nanostructured YSZ TBCs. *Ceramics International*. 2017;43(15):12497-12504.
- 28 Wallace JS, Ilavsky J. Elastic modulus measurements in plasma sprayed deposits. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1998;7:521-526.
- 29 Beele W, Marijnissen G, Van Leishout A. The evolution of thermal barrier coatings—status and upcoming solutions for today's key issues. *Surface and Coatings Technology*. 1999;120:61-67.
- 30 Nicholls JR, Lawson KJ, Johnstone A, Rickerby DS. Methods to reduce the thermal conductivity of EB-PVD TBCs. *Surface and Coatings Technology*. 2002;151:383-391.
- 31 Ercan B, Bowman KJ, Trice RW, Wang H, Porter W. Effect of initial powder morphology on thermal and mechanical properties of stand-alone plasma-sprayed 7 wt.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> coatings. *Materials Science and Engineering A*. 2006;435:212-220.
- 32 Shi M, Xue Z, Zhang Z, Ji X, Byon E, Zhang S. Effect of spraying powder characteristics on mechanical and thermal shock properties of plasma-sprayed YSZ thermal barrier coating. *Surface and Coatings Technology*. 2020;395:125913.
- 33 Haynes JA, Unocic KA, Lance MJ, Pint BA. Impact of superalloy composition, bond coat roughness and water vapor on TBC lifetime with HVOF NiCoCrAlYHfSi bond coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2013;237:65-70.
- 34 Curry N, Tang Z, Markocsan N, Nylén P. Influence of bond coat surface roughness on the structure of axial suspension plasma spray thermal barrier coatings — Thermal and lifetime performance. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier. 2015;268:15-23.

Recebido em: 2 Abr. 2025

Aceito em: 16 Set. 2025

Editor responsável:

André Carlos Silva 