

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DOS REVESTIMENTOS WC-10CO, DIAMALLOY® E STELLITE 6® DEPOSITADOS POR HVOF

Táise Gotardo^{1,2*}, Diego Masotti², Darlan Geremia³, Carlos Pérez Bergmann¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 91501-970, Porto Alegre, Brasil.

²Departamento de Engenharia, Frax-le S.A, 95115-550, Caxias do Sul, Brasil.

³ Departamento de Engenharia, Rizeja Metalurgia, 93140-000, São Leopoldo, Brasil.

*E-mail: taise_gotardo@hotmail.com

Recebido em: 23/12/2017

Aceito em: 04/05/2018

RESUMO

A resistência ao desgaste abrasivo dos revestimentos WC-10Co (Carboneto de Tungstênio), Diamalloy® e Stellite 6®, depositados através do processo de aspersão térmica hipersônica (HVOF) sobre um substrato de aço carbono, foi avaliada através do ensaio normatizado ASTM G 65. Este método utiliza uma roda de borracha pressionada contra os corpos de prova e de areia de sílica como terceiro corpo. Os revestimentos foram caracterizados por metalografia com o objetivo de avaliar quanto à presença de poros, óxidos e partículas não fundidas. Além disso, caracterizou-se a dureza e a adesão dos revestimentos ao substrato metálico. Através dos resultados apresentados neste estudo, pode-se observar, ao final do ensaio abrasivo, que o revestimento com maior resistência ao desgaste abrasivo foi o que também apresentou maior dureza superficial.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo. Aspersão térmica. Adesão. Microdureza Vickers.

1 Introdução

O desgaste abrasivo consiste na remoção de massa devido à presença de asperezas de uma superfície dura e rugosa, ou apenas partículas duras soltas que escorregam em uma superfície mais mole, causando deformação plástica e/ou fratura na interface [1-2].

Este mecanismo leva em consideração as características das partículas e dos grãos abrasivos. Maiores tamanhos de grãos representam maiores taxas de desgaste, enquanto partículas com maiores durezas irão ser mais resistentes ao desgaste [3].

A aplicação de revestimentos em superfícies auxilia na proteção contra o mecanismo de desgaste abrasivo. Existem inúmeros tipos de revestimentos e técnicas de aplicação, com as mais diversas características. No processo de HVOF, o material do revestimento na forma de pó é alimentado e aspergido através de uma pistola. Um combustível (gasoso ou líquido) é queimado juntamente com oxigênio no interior de uma câmara de alta pressão e temperatura elevada. Os produtos desta combustão se expandem através de um bocal em alta velocidade, gerando um fluxo hipersônico. As partículas atingem um estado de elevada plasticidade durante o voo devido às altas temperaturas. Ao atingirem o substrato, as partículas deformam-se, espalhando-se na superfície, formando por superposição as camadas do revestimento [4].

Esta técnica permite obter revestimentos muito densos, com boa aderência ao substrato, baixas tensões residuais. Além de apresentar pouca ou nenhuma oxidação. A sua principal

indicação é para materiais em pó que apresentam ponto de fusão relativamente baixo ou materiais que apresentam degradação térmica em altas temperaturas. A maioria deles são formados por carbeto [5].

Dentre a extensa gama de materiais, os três materiais estudados neste trabalho foram escolhidos por apresentarem boa resistência ao desgaste, cada qual com suas particularidades. O revestimento WC-10Co é amplamente utilizado em aplicações de resistência ao desgaste, devido à presença de partículas de carboneto de tungstênio, fase dura e quebradiça, combinada com a fase dúctil do cobalto em diferentes proporções. O revestimento Diamalloy® possui, também, excelente resistência ao desgaste e resistência a altas temperaturas, além do baixo custo [6]. O Stellite 6® é amplamente utilizado para proteção contra desgaste, principalmente para fenômenos de cavitação e erosão, e igualmente atua contra a corrosão e oxidação a altas temperaturas [7].

Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades e o comportamento de desgaste abrasivo das ligas WC-10Co, Stellite 6® e Diamalloy®, quando aplicados em um substrato de aço carbono.

2 Metodologia

2.1 Aplicação dos revestimentos

Foram utilizadas as ligas comerciais de revestimentos Diamalloy® (base níquel, cromo e ferro), Stellite 6® (base

cobalto, cromo e tungstênio) e WC-10Co (base carbono, tungstênio e cobalto), aplicados pelo processo de HVOF sobre um substrato de aço carbono. A composição química dos pós utilizados para a aplicação está descrita na Tabela 1.

Para a aplicação dos revestimentos, foi utilizada uma pistola modelo Tafa JP 5000 do fabricante Praxair. Os corpos de prova foram previamente preparados através de limpeza química com solvente orgânico, jateamento abrasivo com Al₂O₃, seguido de pré-aquecimento do substrato, utilizando os mesmos parâmetros de aplicação.

O número de passes da pistola sobre os substratos durante a aspersão foi o que assegurasse uma espessura desejada mínima de 0,150 mm. Os parâmetros mantidos constantes foram: velocidade de deslocamento da pistola (100 m/s), a pressão e a vazão de oxigênio (10,3 bar/152 L/min) e a taxa de alimentação do pó de aspersão (38 g/min). Os outros parâmetros utilizados obedeceram aos determinados pelo fabricante do pó de cada liga, apresentados na Tabela 2. A temperatura da superfície do substrato foi mantida abaixo de 200°C, sendo necessário para tal interromper a aplicação, o que promovia a redução de temperatura dos corpos de prova.

Tabela 1- Composição química elementar dos pós para aspersão térmica utilizados.

Material	C	Si	Cr	Ni	Co	W	Fe	B
Stellite 6®	1,20	<1,5	29,0	<3,0	R	4,50	<3,0	<2,0
Diamalloy®	0,80	4,20	16,6	70,6	-	-	4,40	3,11
WC-10Co	5,40	-	4,22	-	9,89	R	0,07	-

R= restante

Tabela 2 - Parâmetros de aplicação dos revestimentos

	Stellite®	Diamalloy®	WC-10Co
Distância de aspersão (mm)	220	230	230
Pressão (bar)/Vazão ar (L/min)	6,9/376	7,2/376	6,9/376
Tamanho das partículas (µm)	15-53	15-45	16-45

2.2 Caracterização do revestimento

Os corpos de prova não receberam acabamento extra, mantendo a rugosidade *Ra* gerada durante a aplicação, que variou entre 5 e 7 µm. Essa rugosidade foi verificada utilizando um rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo SJ-210.

O ensaio metalográfico foi realizado com o objetivo de avaliar o substrato, em relação à presença de poros, óxidos, partículas com baixa plasticidade e impurezas, além da espessura da camada depositada. As amostras foram analisadas com auxílio de um microscópio eletrônico Zeiss, modelo Axio Scope.A1. As amostras foram preparadas através do método de embutimento a quente, utilizando como resina a baquelite. O reativo utilizado para o ataque das amostras foi composto de água, ácido nítrico e ácido clorídrico.

A microdureza Vickers dos revestimentos foi determinada através de medidas da seção transversal das superfícies, aleatoriamente definidas até a obtenção de cinco pontos. A carga aplicada foi de 1 N durante 14 segundos. O equipamento utilizado foi um microdurômetro marca Mitutoyo, modelo MicroWizhard.

A aderência dos revestimentos foi determinada através da aplicação de uma tensão normal à superfície. Para este ensaio, uniu-se o corpo de prova a um contracorpo de mesma dimensão, utilizando para isso um adesivo HTK Ultrabond 100®. Posteriormente, uma carga foi aplicada na direção perpendicular à interface entre o revestimento e o substrato até o rompimento de uma das partes. O adesivo utilizado deve possuir resistência mecânica pelo menos igual ou maior que a resistência de adesão mínima requerida entre o revestimento e o substrato, sendo esta a força identificada durante o ensaio.

Os corpos de prova possuíam dimensões cilíndricas com ø 25 mm com 25 mm de altura. O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio universal, marca Shimadzu, modelo AG-X plus100kN, com uma velocidade constante de deslocamento de 0,013 mm/s.

O ensaio de desgaste abrasivo foi baseado na norma ASTM G65 [8] com o objetivo de simular a resistência à abrasão dos revestimentos, utilizando areia de sílica padronizada como abrasivo seco. Ao final do ensaio, foi possível medir o desgaste através da perda de volume, considerando a densidade do material e a diferença de massa inicial e final dos corpos de prova. O desgaste foi avaliado a temperatura ambiente.

A amostra ensaiada possuía superfície plana, na forma de uma placa, que foi pressionada através de uma carga constante contra uma roda revestida de borracha. O material abrasivo é despejado através de um bocal na parte superior do equipamento, onde desliza entre a roda de borracha e o corpo de prova. A roda de borracha possuía dureza definida e justaposta à superfície de um disco de aço. O diâmetro do disco era de 228,6 mm com largura e espessura iguais a 12,7 mm. As condições que foram realizados os ensaios estão descritas da Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste ASTM G65.

Parâmetros	Valor
Carga aplicada (N)	130
Rotação do disco (rpm)	200+/-10
Alimentação do abrasivo (g/min)	300 a 400
Dimensões da amostra (mm ³)	25 x 75 x 12,7
Velocidade (mm/min)	22.860
Número de voltas	500
Dureza da borracha	58 a 62

3. Resultados e discussões

3.1 Metalografia

As micrografias dos revestimentos aspergidos estão representadas na Figura 1. É possível observar a presença de poros e de partículas com baixa plasticidade em todos os revestimentos. As microestruturas encontradas são típicas de revestimentos aspergidos. Revestimentos termicamente aspergidos são tipicamente formados por camadas lamelares, intercaladas por inclusões de óxidos, microtrincas, partículas sólidas e porosidade, sendo que a quantidade dessas fases influenciará diretamente nas propriedades finais do revestimento. Estas características podem ser evitadas ou minimizadas variando parâmetros de processo [9].

Pelas imagens da Figura 1, constata-se a presença de estrutura lamelar no revestimento Stellite 6® e menor porosidade da liga Diamalloy®, estas microestruturas são típicas de revestimentos aspergidos encontrados na literatura [10-11]. A espessura média da camada depositada de cada revestimento está representada na Tabela 4.

Tabela 4 - Espessura média dos revestimentos.

Espe ssura média da camada (mm)	
Stellite 6®	0,103
Diamalloy®	0,151
WC-10Co	0,183

Observa-se que a espessura desejada não foi alcançada para o corpo de prova que recebeu o revestimento Stellite 6® e foi maior para o revestimento WC-10Co. Este controle é realizado de forma manual com o auxílio de um medidor de camada durante o processo de aplicação. Somente, após análise

metalográfica foi possível verificar o valor real da camada depositada.

3.2 Microdureza

O revestimento WC-10Co apresentou maior dureza, 1297 HV, seguido do revestimento Diamalloy® com 736 HV e do Stellite 6® com 506 HV. Estes resultados estão condizentes com a literatura [12–6, 13]. A alta dureza do carboneto de tungstênio está associada à sua estrutura cristalográfica hexagonal.

Os resultados de todos os pontos medidos em cada revestimento estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Resultados de microdureza Vickers.

Material	1	2i	3	4	5	média	desvio padrão
Stellite 6®	557	555	510	388	519	506	56
Diamalloy®	678	809	739	724	728	736	38
WC-10Co	1218	1279	1339	1469	1179	1297	93

O desvio padrão apresentado pelo revestimento Stellite 6® superou 10%. Analisando os dados apresentados na Tabela acima é possível observar que este resultado está atrelado ao ponto 4, onde a dureza encontrada foi de apenas 388 HV. Acredita-se que este ponto seja um poro apresentado pelo revestimento.

3.3 Aderência

Durante o ensaio de adesão, o rompimento de todos os revestimentos ocorreu entre o revestimento e o adesivo, confirmando uma boa coesão e adesão. Todos os revestimentos apresentaram força de adesão média próximas a 70 MPa, valor mínimo para o rompimento do agente de ligação. A média dos valores encontrados está apresentada na Figura 2

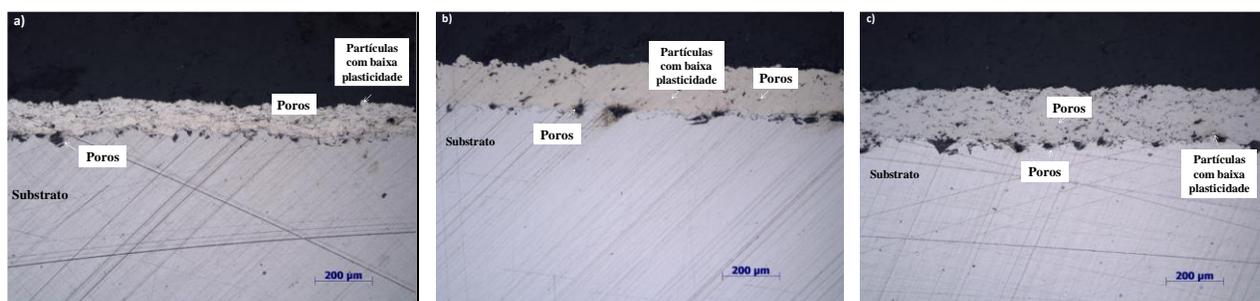


Figura 1 – Micrografia dos revestimentos aplicados por HVOF destacando a presença de poros e partículas com baixa plasticidade a) Stellite 6®; b) Diamalloy®; c) WC-10Co.

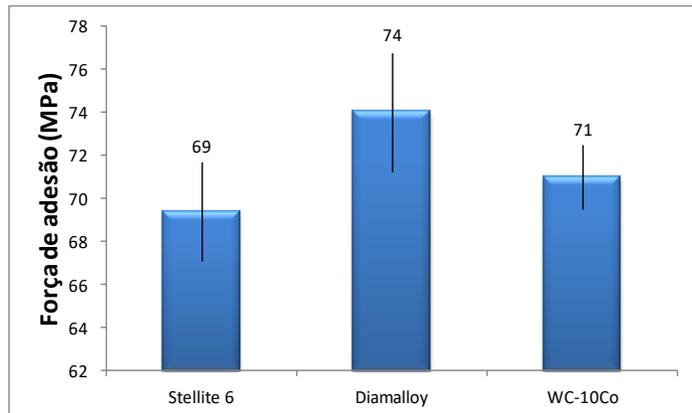


Figura 2. Média dos valores da força de adesão dos revestimentos investigados.

3.2 Desgaste abrasivo

Os resultados do ensaio abrasivo realizado são apresentados na Figura 3, em perda de volume. É possível observar que os revestimentos apresentaram significativa diferença de comportamento quanto à resistência ao desgaste abrasivo. O revestimento que menos perdeu volume foi o WC-10Co, seguido pelo Diamalloy® e pelo revestimento Stellite 6®.

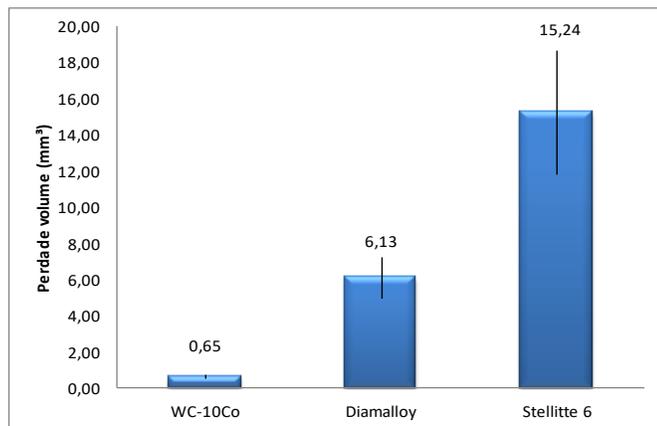


Figura 3. Perda de volume dos revestimentos após ensaio abrasivo.

O modelo proposto por J. A. Williams e A. M. Hyncica, publicado em 1992 [14], supõe que o mecanismo de desgaste abrasivo resulta de algumas variáveis do ensaio a que materiais podem ser submetidos, tais como: a carga gerada pelo abrasivo na superfície; o comprimento do maior eixo das partículas e o fator geométrico das partículas. Em relação ao ensaio realizado, esses fatores de influência foram os mesmos para os revestimentos ensaiados, sendo apenas a dureza de cada revestimento a variável considerada.

Considerando além disso, que todos os revestimentos possuem tamanho de partículas e rugosidade similares, é possível relacionar a resistência ao desgaste abrasivo dos revestimentos investigados com a sua dureza, sendo que o revestimento que

apresentou maior dureza também apresentou maior resistência ao desgaste abrasivo. A Figura 4 ilustra esta relação experimental.

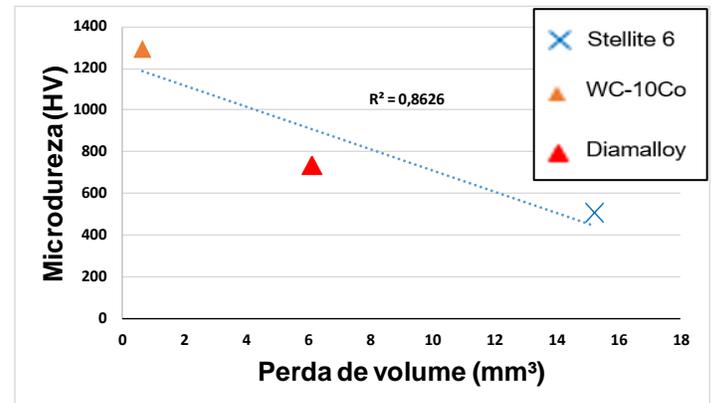


Figura 4 - Relação microdureza x perda de volume dos revestimentos

4 Conclusões

A partir da realização do trabalho experimental e da análise dos seus resultados, foi possível concluir que a resistência ao desgaste abrasivo dos revestimentos investigados (Stellite 6®, Diamalloy® e WC-10C) variou significativamente, conforme a natureza de cada revestimento;

Foi possível verificar uma relação direta entre a resistência ao desgaste abrasivo e a dureza de cada revestimento: o revestimento de maior dureza superficial apresentou a maior resistência ao desgaste abrasivo (WC-10Co) e o que apresentou menor dureza (Stellite 6®) foi o que apresentou menor resistência ao desgaste;

A microdureza obtida em cada revestimento é condizente com o encontrado na literatura para revestimentos industrialmente produzidos;

Os revestimentos apresentaram elevada adesão ao substrato, rompendo em uma força média aproximada de 70 MPa. Não foi possível verificar uma relação entre a resistência ao desgaste abrasivo

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Rizeja Metalurgia pela confecção das amostras e realização dos ensaios e a empresa Frasle S.A por financiar o projeto.

EVALUATION OF THE RESISTANCE TO ABRASIVE WEAR OF HVOF THERMAL-SPRAYED WC-10CO, DIAMALLOY, AND STELLITE 6 COATINGS

ABSTRACT: The resistance to abrasive wear of coatings WC-10Co, Diamalloy®, and Stellite 6® deposited through the high velocity oxi-fuel (HVOF) process on a carbon iron substrate was evaluated through the ASTM G 65 standardized abrasive tests.

This method uses a rubber wheel pressed against the test specimens and silica sand as third body abrasive particles. Coatings were characterized by metallography assays to check the presence of pores, oxides and unfused particles. Furthermore, the hardness and the adhesion of the coatings to the metal substrate was characterized. Through the results shown on this study, it was possible to observe that, at the end of the abrasive test, the coating with greater resistance to abrasive wear also presented greater surface hardness.

Keywords: Abrasive wear. Thermal Spraying. Adhesion. Vickers Microhardness.

Referências

- [1] LAMB, R.G. Estudo do comportamento de desgaste de materiais de atrito em função de variáveis de aplicação. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.
- [2] BANDEIRA, A. L. Comportamento do desgaste e posterior corrosão do sistema duplex AISI 4140 nitretado/CrN em bioetanol combustível. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2012.
- [3] SOUZA, M.M. Avaliação do comportamento tribológico e das propriedades de superfície do aço 4140 revestido pelos processos HVOF e cromo duro eletrodepositado. 2014. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2014.
- [4] LIMA, C.R.C. *et al.* Study of the wear and corrosion characteristics of thermal sprayed and welded coatings. *Material Science and Technology*, Oct. 2012.
- [5] Magnani, M. Estudo da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos metálico-cerâmicos aplicados na liga AA7050 mediante aspersão térmica oxicomustível de alta velocidade (HVOF). 2008. 241f. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2008.
- [6] SHABANA, M.M.M. *et al.*; Tribological and corrosion behavior of HVOF sprayed WC-Co, NiCrBSi and Cr₃C₂-NiCr coatings and analysis design of experiments. *Materials Today: Proceedings*, Andhra Pradesh, V. 2, p. 2654-2665, Sept. 2015.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TEST FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM G65/2017, Standard Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.
- [8] HOUDKOVÁ, S. *et al.* Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings. *Surface & Coatings Technology*, Plzen, v. 318, p. 129-141, Sept, 2016.
- [9] LIMA, C.C; TREVISAN, R. *Aspersão Térmica: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Artliber, 2001.
- [10] KAROGLANLI, A. C.; OGE, M.; DOLEKER, K. M.; HOTAMIS, M.. Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition. *Surface & Coatings Technology*, Bartin, v. 318, p. 299-308, Feb., 2017.
- [11] STANFORD, M. K.; JAIN, V. K.. Friction and wear characteristics of hard coatings. *Wear*, Dayton, v. 251, p. 990-996, Oct., 2001.
- [12] FEDERICI, M. *et al.* Effect of roughness on the wear behavior of HVOF coatings dry sliding against a friction material. *Wear*, Trento, V. 368-369, p. 326-334, Oct, 2016.
- [13] FARNIA, A. *et al.* Effect of Ta on the microstructure and hardness of Stellite 6 coating deposited by low power pulse laser treatments. *Surface & Coatings Technology*, Tehran, v. 213, p. 278-284, Nov. 2012.
- [14] TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M.. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*, Cambridge, v. 225-229, p. 205-214, Apr., 1999.