

Tema: Engenharia de superfície

## COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA (HVOF) COMO ALTERNATIVA AO CROMO ELETRODEPOSITADO\*

Matheus Machado de Souza<sup>1</sup>  
 Filipi Flor Teixeira<sup>2</sup>  
 César Edil da Costa<sup>3</sup>  
 Júlio César Giubilei Milan<sup>3</sup>

### Resumo

A utilização de revestimentos a base de cromo eletrolítico traz prejuízos ao meio ambiente, uma vez que durante o processo são liberados íons de cromo hexavalente e estes são extremamente tóxicos à natureza e ao homem. No entanto, existem outras tecnologias que vem sendo estudadas como alternativas ao processo tradicional de cromagem. A aspersão térmica por oxi-combustível de alta velocidade (HVOF) é a técnica que tem apresentado os melhores resultados sob as óticas de qualidade de revestimento, porosidade, resistência ao desgaste, propriedades mecânicas e adesivas. Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo da eficácia da técnica de HVOF em termos de adesão, resistência ao desgaste e coeficiente de atrito. Como substrato foi utilizado o aço SAE 4140; o revestimento utilizado na aspersão por HVOF foi o WC-Co-Cr em comparação como o cromo eletroliticamente depositado, todos com a mesma espessura de camada. A avaliação tribológica foi realizada através de ensaios de desgaste por deslizamento do tipo pino sobre disco e a resistência adesiva por meio de ensaio de adesão.

**Palavras-chave:** Aspersão térmica; HVOF; Desgaste; Adesão.

### TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF THERMAL COATINGS SPRAYED BY HVOF AS ALTERNATIVE TO CHROMIUM ELECTROPLATED

#### Abstract

The use of coatings based in electrolytic chromium deposition causes damages to the environment, since during the process, hexavalent chromium ions are released and these are extremely toxic to nature and man. However, other technologies have been studied as alternatives to the traditional chromium electroplating process. The thermal spray high velocity oxy-fuel (HVOF) is a technique that has shown the best results considering coating quality, porosity, wear resistance, mechanical and adhesive properties. In this paper, a comparative study of HVOF efficacy was realized in terms of adhesion, wear resistance and friction coefficient. The substrate used was the SAE 4140; the spray coating WC-Co-Cr was applied by HVOF and compared with chromium electroplated, all coatings had the same layer thicknesses. The tribological evaluation was performed by sliding wear testing type pin on disc and the bond strength by adhesion test.

**Keywords:** Thermal spray coatings; HVOF; Wear; Adhesion.

<sup>1</sup> Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais, UDESC, Florianópolis, SC, Brasil.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, UDESC, Florianópolis, SC, Brasil.

<sup>3</sup> Doutor, Prof. Associado, CCT, UDESC, Florianópolis, SC, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Necessidades tecnológicas trazem consigo a exigência por elementos mecânicos com propriedades cada vez mais diferenciadas e específicas, como por exemplo, elevada dureza superficial, alta resistência ao desgaste e à corrosão. O tratamento de superfície mais difundido e utilizado comercialmente para garantir a resistência ao desgaste e à corrosão de superfícies é a eletrodeposição de cromo duro funcional [1], ou galvanização eletrolítica de cromo – EHC [2]. No entanto, o cromo está presente na lista de materiais tóxicos da Agência de Proteção ao Meio Ambiente - EPA [3]. O banho ácido gerado pelo processo eletrolítico contém elevadas quantidades de íons  $\text{Cr}^{6+}$  que ficam dispersas pelo ar e são difíceis de serem retidas em filtros e drenos [4]. A legislação ambiental existente restringe o uso de produtos químicos que contêm íons de cromo hexavalente e fundamenta a necessidade de desenvolvimento de processos alternativos de revestimento menos danosos ao meio ambiente [3].

Em adição aos problemas ambientais, tecnicamente, no revestimento por eletrodeposição de cromo encontram-se alguns aspectos negativos como a fragilização por hidrogênio e a não garantia da qualidade e homogeneidade do tratamento [5]. A presença de microtrincas e tensões de tração na região de interface entre revestimento e substrato contribuem para a delaminação da camada de cromo e redução da resistência à fadiga do material [6,7].

Dentre as tecnologias em desenvolvimento que propõe a substituição do processo tradicional de cromagem destaca-se a aspersão térmica. Uma grande variedade de materiais pode ser processada através da aspersão por plasma, chama ou arco elétrico [1]. Todas elas tem se mostrado capazes de substituir o processo tradicional de cromagem, em especial a técnica de HVOF (*high velocity oxy-fuel*) [6]. Isto porque esta produz revestimentos de alta qualidade, com baixa porosidade (<1%) e com forças de ligação altamente aderentes ao substrato, normalmente, maiores que 50 MPa [8].

### 1.1 Aspersão Térmica e HVOF

A aspersão térmica pode ser definida como um grupo de processos por meio dos quais se deposita camadas de materiais metálicos ou não metálicos finamente divididos sobre uma superfície previamente preparada, a fim de se obter um depósito aspergido sobre este substrato [9].

As partículas aspergidas aderem ao substrato por mecanismos de natureza mecânica, químico-metalúrgica e física, dependendo da temperatura da fonte de calor e da velocidade imposta às partículas. Por sucessivas colisões e sobreposição umas das outras formam camadas de estrutura típica lamelar, como “panquecas” achatadas, que também são constituídas por inclusões de óxidos, vazios e porosidades [10, 11].

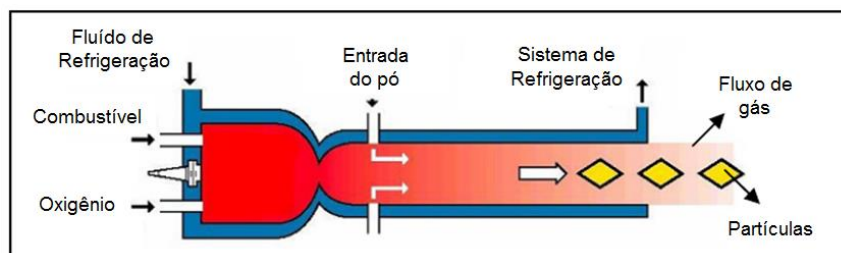
Grande parte dos pós aspergidos são carbetos, principalmente de tungstênio e cromo [12]. Os principais tipos de materiais para revestimentos citados pela literatura que possuem elevada dureza, incluindo condições de trabalho a quente, resistência ao desgaste e à corrosão são: WC-Co, WC-Ni, WC-Co-Cr, WC-Cr-Ni e  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ . Estes materiais têm as características de possuírem carbetos de alta dureza, imersos em uma matriz relativamente tenaz e dúctil de Co, Ni, Co-Cr ou Ni-Cr, cuja função é promover união das partículas [1, 13, 14].

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

De maneira geral, pode-se afirmar que as propriedades e o comportamento mecânico de um depósito aspergido são dependentes da aderência entre as lamelas e o substrato, da microestrutura lamelar e da resistência coesiva entre as lamelas. Estas propriedades também são influenciadas pela quantidade de defeitos existentes no revestimento, como tamanho e morfologia dos poros, presença de trincas, óxidos e etc. [15].

A aspersão óxi-combustível de alta velocidade (HVOF) é uma técnica baseada, em especial, no projeto da tocha (pistola) de aspersão em que o combustível, normalmente propano, propileno, metil-acetileno, ou querosene, é misturado com oxigênio e queimado em uma câmara de combustão onde a chama é comprimida. Os produtos da combustão são em seguida liberados e se expandem através de um bocal onde as velocidades do gás se tornam supersônicas. O pó do revestimento é introduzido no bocal, aquecido e acelerado para fora do mesmo. Devido ao impacto sobre o substrato, as partículas aspergidas são finamente distribuídas, o que produz um revestimento bastante denso e com ótima aderência ao substrato [9, 16].

As pistolas de aspersão HVOF são classificadas em três gerações de acordo com as pressões aplicadas no processo. Os equipamentos de primeira e segunda geração (CDS, Top Gun, Jet-kote e Diamond Jet) operam em pressões de 3 a 5 bar, enquanto que os de terceira geração (DJH 2600, DJH 2700, JP-5000, OSU Carbide Jet e Top Gun K) atingem valores entre 6 a 10 bar. A construção destas pistolas permite alcançar maiores velocidades de partículas quando comparados com as velocidades dos outros dois sistemas [9]. A Figura 1 mostra, esquematicamente, uma tocha para HVOF, modelo JP-5000.



**Figura 1.** Princípio de funcionamento de uma tocha de aspersão térmica HVOF, modelo JP-5000 [17].

Segundo Grasset (2003), apud Pawlowski [16], o processo de aspersão térmica pelo método HVOF tornou-se um padrão na aspersão de carbetos e com muitas aplicações na indústria, principalmente em substituição à utilização do cromo eletrolítico. Geralmente, os materiais aspergidos como substitutos do cromo são os carbetos e ligas pulverizadas. Além da qualidade do revestimento e tensões residuais menores, outras vantagens deste processo incluem a eficiência do depósito, reduzida sensibilidade ao ângulo de aspersão e menos variáveis críticas de processo [18, 19].

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento tribológico do aço SAE 4140 revestido com WC-Co-Cr pelo processo de HVOF em comparação com o cromo duro eletrodepositado e com o material base do substrato temperado e revenido sem revestimento. Para esta avaliação do material, além de ensaios de desgaste por deslizamento do tipo pino sobre disco, foram realizados ensaios de adesão da camada, e microdureza. A análise morfológica da superfície foi realizada por microscopia óptica. Os mecanismos de desgaste foram avaliados através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir do aço carbono 4140, adquirido de acordo com a norma SAE J 400, de composição química conforme Tabela 1, foram preparadas as amostras para cromagem e aspersão térmica. Para a caracterização, e ensaio de resistência ao desgaste, os corpos de prova foram confeccionados de barras de diâmetro 50,8 mm, e cortadas em discos com 10 mm de espessura e em conformidade com a norma ASTM G99. Para os ensaios de adesão do revestimento as amostras foram produzidas de acordo com a norma ASTM C633, a partir de barras de diâmetro 25,4 mm. Todas as amostras foram temperadas e revenidas (austenitização a 890°C, seguido de resfriamento em óleo, revenido a 200°C por duas horas e em seguida a 580°C por mais duas horas), tratamento que resultou em uma estrutura inicial martensítica revenida de dureza média  $375 \pm 25$  HV. Posteriormente ao tratamento térmico foi dado acabamento retificado nas faces para deposição dos revestimentos e a rugosidade média resultante foi de  $Ra 3,17 \pm 0,121 \mu\text{m}$  e  $Rz 17,85 \pm 0,222 \mu\text{m}$ , medidos com rugosímetro Mahr modelo Perthometer S2.

**Tabela 1:** Composição química nominal do aço SAE 4140.

Material	C (%)	S (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Cr (%)	Mo (%)
SAE 4140	0,38 a 0,43	Máx. 0,04	0,75 a 1,00	0,15 a 0,35	Máx. 0,030	0,80 a 1,10	0,15 a 0,25

### 2.1 Cromagem

A eletrodeposição de cromo duro foi realizada através de um Retificador de Corrente Eiko® de 3000 A e 380 V, em uma solução contendo 230 g/L de ácido crômico e 1,2 g/L de ácido sulfúrico (catalizador), com proporção em peso de ácido crômico ( $\text{CrO}_3$ ) e catalizador ( $\text{SO}_4$ ) entre 190 e 210 para 1. A densidade de corrente utilizada para a deposição foi de 40 A/dm<sup>2</sup> e a velocidade de deposição variou entre 20 e 25  $\mu\text{m/h}$ . Durante as 8,5 horas de tratamento a temperatura do banho ficou entre 58 e 62°C. A rugosidade média obtidas nas amostras após a eletrodeposição ficou em  $2,86 \pm 0,113 \mu\text{m}$  para Ra e  $15,75 \pm 381 \mu\text{m}$  para Rz. A espessura medida após a deposição do cromo ficou  $203 \pm 16 \mu\text{m}$ .

A preparação das amostras para cromagem incluiu a adição de material isolante à base de tinta plástica nas faces em que não foi adicionado o cromo, limpeza das amostras com desengraxante alcalino, desoxidação e ataque anódico de 20 A/dm<sup>2</sup>, durante 1 a 3 minutos. Após a eletrodeposição, os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico de desidrogenação por 8 horas a 190°C.

### 2.2 Aspersão Térmica HVOF

Para a aspersão térmica, foi utilizado uma pistola HVOF de terceira geração modelo JP-5000, comprimento do canhão de 152 mm, com painel de controle Praxair® 5120. O ângulo de aspersão entre a face da peça e a direção do jato da pistola ficou em 90° e a distância entre a extremidade da pistola e a face da amostra foi de 300 mm. O pó utilizado no processo foi o carbeto de tungstênio, WC-10Co-4Cr (porcentagem em peso específico: 86%WC; 10%Co; 4%Cr), de partículas esféricas, aglomeradas e sinterizadas, granulometria de 45 +15  $\mu\text{m}$ , produzido pela Sulzer Metco® (nome comercial do pó: WOKA 3652). Os parâmetros de aspersão utilizados seguiram as recomendações do fabricante do pó: taxa de aspersão de 5,4 Kg/h,

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



combustível de querosene com vazão de 0,385 L/s, e vazão de oxigênio de 15 L/s. A rugosidade superficial média obtidas nas amostras após a aspersão ficou em  $2,62 \pm 0,266 \mu\text{m}$  para Ra e  $13,25 \pm 1,153 \mu\text{m}$  para Rz. A espessura do revestimento aspergido ficou em  $281 \pm 23 \mu\text{m}$ .

### 2.3 Ensaio de Desgaste

Para os ensaios de desgaste por deslizamento do tipo pino sobre disco foi utilizado um tribômetro desenvolvido na UDESC. Os testes de desgaste foram realizados de acordo com a norma ASTM G99 de 2005 [20]. Todas as amostras foram retificadas para adequação da rugosidade (inferior a  $1 \mu\text{m}$ ). Antes da execução dos ensaios, as amostras foram limpas através de ultrassom com acetona para remoção de impurezas que poderiam interferir nos resultados.

Para cada condição de revestimento foram realizados cinco ensaios. O contra corpo utilizado nos ensaios de desgaste foi uma esfera de alumina polida de 6,0 mm de diâmetro. Os ensaios de desgaste foram realizados de acordo com os seguintes parâmetros:

- Temperatura ambiente ( $\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- Carga aplicada sobre o pino: 10 N;
- Velocidade de deslizamento: 0,1 m/s;
- Distância de deslizamento: 1000 m;
- Raio da pista de desgaste: 6,0 mm;

O volume de material removido foi obtido com o auxílio de um Perfilômetro CV-2000 Contrace Mitutoyo. A análise da área do perfil da pista de desgaste foi realizada através de uma rotina computacional especialmente desenvolvida para o cálculo de volume de material removido, a partir de um arquivo de dados da topografia da superfície dos corpos de prova ensaiados.

### 2.4 Ensaio de Adesão

Para os ensaios de adesão do revestimento foi utilizado o equipamento para testes de tração da Shimadzu®, modelo AG-X plus de 100 kN. O procedimento de ensaio seguiu as recomendações da norma ASTM C633 [21]. A velocidade de avanço no sentido de separação das amostras foi de 0,013 mm/s. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente com umidade controlada inferior a 40%.

O processo de preparação das amostras envolveu o jateamento das faces em contato com a resina (corpo e contra corpo) com óxido de alumínio, limpeza com álcool e secagem à quente através de um secador a ar convencional. A resina adesiva utilizada foi a HTK Ultra Bond® 100. Corpo e contra corpo foram mantidos pressionados em contato direto por 80 minutos a  $150^\circ\text{C}$ , conforme instruções do fabricante desta resina.

### 2.5 Caracterização das Amostras

Com o objetivo de avaliar a morfologia da camada dos revestimentos foram realizadas análises de microdureza e microscopia óptica na superfície dos revestimentos. Os testes de microdureza foram realizados em um microdurômetro Shimadzu HMV – 2T. Em cada profundidade realizou-se, no mínimo, 6 identificações, obtendo-se então o valor de microdureza médio na posição estudada. A carga utilizada foi de 100 g ( $\text{HV}_{0,1}$ ), tempo de identificação de 10 segundos e distância entre

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

identações de 2,5 a 3 diagonais de indentação. Para se analisar os mecanismos de desgaste envolvidos foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Microscopia Óptica e Microdureza

A análise da microscopia óptica na superfície do revestimento de cromo duro revelou uma microestrutura homogênea, mas com quantidade significativa de trincas, conforme pode ser visualizado pela Figura 2a. Tensões residuais de tração são características comuns encontradas nos revestimentos de cromo duro provenientes da decomposição dos hidretos de cromo, durante o processo de eletrodeposição. Esta decomposição é acompanhada por uma redução de volume (de até 15%) e deixam o substrato imediatamente abaixo do revestimento sob tensões residuais de tração e propício a formação de microfissuras [3]. No caso do carbeto de tungstênio foi possível observar uma microestrutura densa e finamente distribuída em uma topografia rugosa. As áreas em destaque na Figura 2b indicam as irregularidades na superfície do revestimento que é formada por picos e vales proveniente do próprio processo de aspersão.

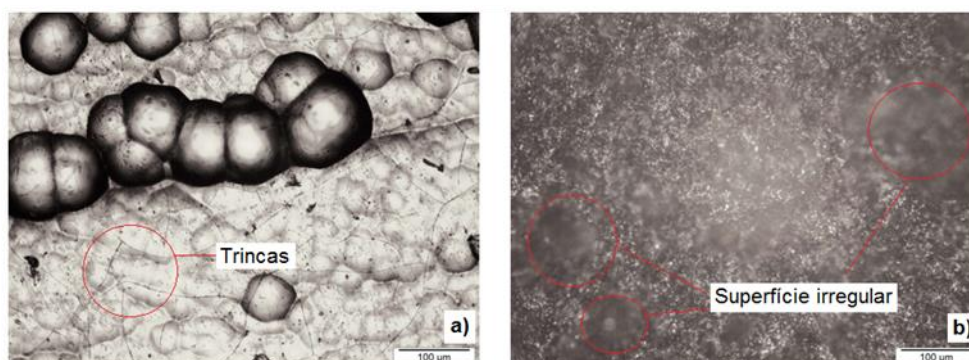


Figura 2 – Superfície do revestimento; (a) Cromo duro; (b) WC-Co-Cr.

Os valores de microdureza na superfície das amostras são mostrados na Figura 3.

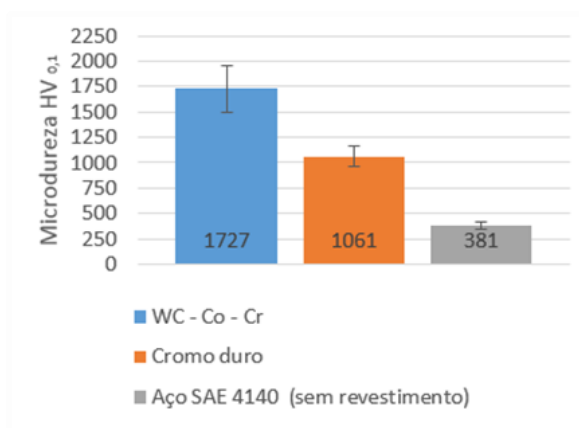


Figura 3 – Microdureza.

Quanto à dureza da camada depositada, diversos autores verificaram em seus estudos que revestimentos a base de carbetos aplicados por HVOF podem apresentar dureza superiores à 1000 HV, com porosidade menor do que

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1% [8, 22, 23]. Revestimentos depositados por HVOF apresentam elevada densificação da camada aspergida e baixo grau de porosidade, o que na maioria dos casos justifica uma dureza mais acentuada do que em outros processos [8, 24, 25]. Um menor valor de dureza para o cromo duro já era esperado em função do tratamento de desidrogenação. Uma vez que os íons  $H^+$  são reduzidos no cátodo, juntamente com o  $Cr^{6+}$  e o  $Cr^{3+}$ , hidrogênios em sua forma atômica são dissolvidos pelo interior do revestimento de cromo, tornando ele mais duro e, conseqüentemente, com menor plasticidade. A desidrogenação diminui parcialmente o grau de dureza do revestimento, pois promove a liberação do hidrogênio atômico [2].

### 3.2 Resistência Adesiva

A resistência mecânica e adesiva de um revestimento aspergido depende basicamente da aderência entre este e o substrato, e da coesão entre suas partículas [9]. A resistência adesiva de alguns compósitos pode ser de tal ordem que as tensões necessárias para arrancar a camada do substrato atingem valores de até 50 MPa para materiais ferrosos e de 80 MPa para revestimentos cerâmicos [9]. Nos ensaios de adesão regidos pela ASTM C633, duas amostras idênticas são unidas por material adesivo e, então, são tracionadas axialmente até a ruptura. O valor da tensão máxima de adesão e coesão é obtido pela divisão da carga de ruptura pela área da seção transversal [21]. Os resultados de resistência adesiva dos revestimentos obtidos nesta pesquisa encontram-se na Figura 4.

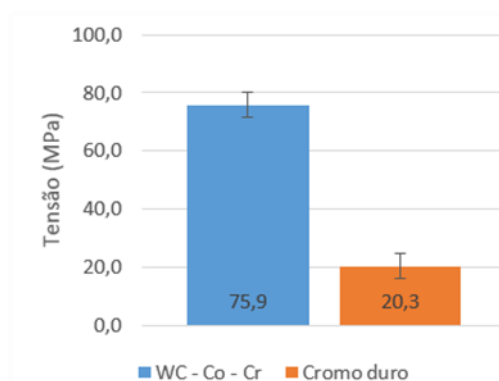


Figura 4 – Adesão do revestimento.

Existem basicamente três modos de fratura e separação dos corpos de prova: na região do adesivo, na região do revestimento e na interface do revestimento com o substrato. Neste estudo, todas as amostras, para ambos materiais, romperam na região do adesivo. É importante salientar que a norma utilizada para verificação da resistência adesiva é recomendada somente para revestimentos aspergidos. Tentou-se verificar a adesão do cromo duro ao substrato utilizando-se os mesmos requisitos técnicos balizados pela ASTM C633, porém, a condição de ancoramento do adesivo, no caso do cromo, não foi suficiente para obtenção de um resultado qualitativamente satisfatório.

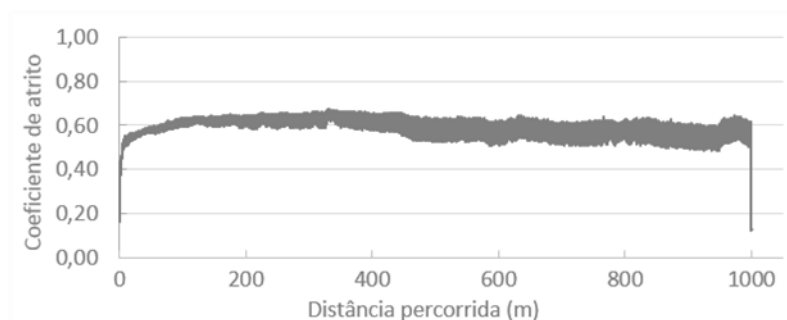
Para o revestimento aspergido, verificou-se um valor elevado de adesão do revestimento ao substrato e de coesão entre as lamelas da camada depositada, ambos maiores do que as tensões adesivas da resina. Em recente publicação, foi verificada esta impossibilidade de determinação do valor final da força de adesão em

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

revestimentos aplicados por HVOF porque a resistência de ligação do adesivo utilizado nos testes foi menor do que a resistência das camadas depositadas, à exemplo do que foi observado neste trabalho [26].

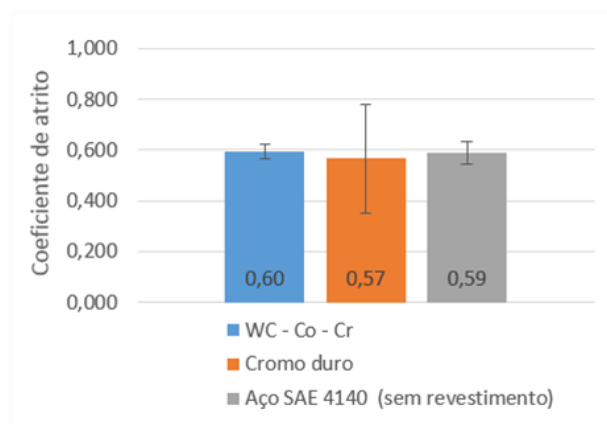
### 3.3 Resistência ao Desgaste

Durante a realização dos ensaios de desgaste por deslizamento do tipo pino sobre disco foi verificada a variação do coeficiente de atrito em função da distância percorrida. Para o tribossistema formado entre a esfera de alumina e as amostras, o comportamento do coeficiente de atrito foi semelhante em todos os ensaios, ao permanecer praticamente constante no período considerado, conforme apresentado na Figura 5.



**Figura 5** – Variação do coeficiente de atrito. Ex. amostra WC-Co-Cr.

O valor médio do coeficiente de atrito foi medido sem considerar os primeiros 50 metros de deslizamento, pois no período inicial de movimentação ele não possui estabilidade. Os resultados obtidos para o coeficiente de atrito estão mostrados na Figura 6.



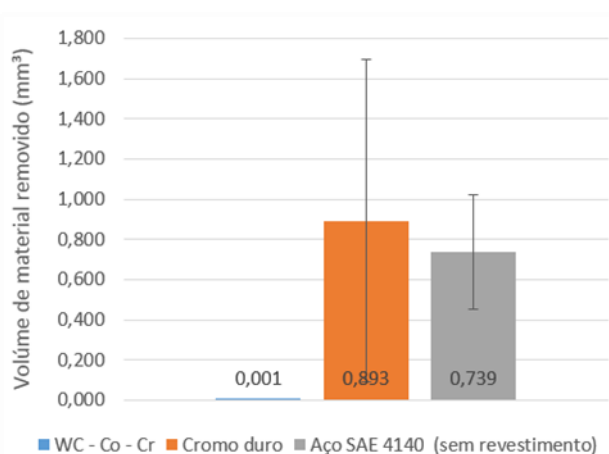
**Figura 6** – Coeficiente de atrito.

Para as condições e revestimentos estudados, o valor do coeficiente de atrito resultante manteve-se nos mesmos patamares das amostras não revestidas, o que, no tribossistema utilizado, pode indicar a aplicabilidade destes revestimentos sem que o desempenho original do material do substrato seja modificado em suas funções principais. Porém, é necessário cautela ao extrapolar os resultados para tribosistemas distintos.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



O desgaste foi medido de acordo com o volume de material removido da pista de desgaste. A Figura 7 resume os resultados obtidos para os ensaios de desgaste realizados.



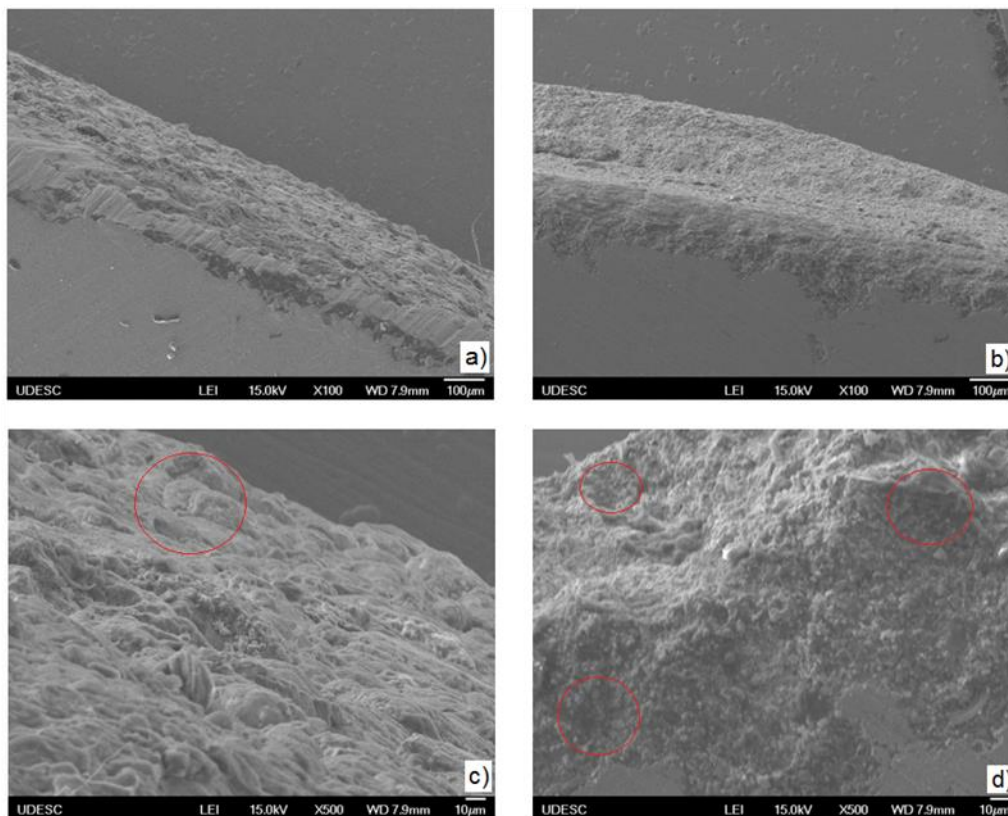
**Figura 7** – Desgaste em termos do volume de material removido.

O melhor desempenho quanto à resistência ao desgaste foi observado para as amostras revestidas por HVOF com carbeto de tungstênio. Materiais com alta dureza, normalmente são associados a materiais com elevada resistência ao desgaste [27]. A literatura relacionada indica que revestimentos a base de carbetos aplicados por HVOF (como WC-Co-Cr, WC-12Co, WC-17Co, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr e WC-10Ni) possuem melhores resultados de resistência ao desgaste quando comparados com amostras recobertas por cromagem eletrolítica [1, 2, 6, 8, 28, 29].

Os mecanismos de desgaste foram estudados através da avaliação das imagens obtidas por MEV, mostradas na Figura 8. No caso do revestimento aplicado por HVOF, o mecanismo primário de formação da pista parece ter envolvido o rompimento gradual das asperidades do revestimento, formando um vale na região do contato com o contra corpo. A região ao fundo da pista se assemelhou ao de uma superfície polida de matriz dura (Figura 8b) enquanto que a região mais externa da pista (Figura 8d) mostrou saliências originadas pelo desprendimento de material a partir da matriz desgastada, o que pode indicar adesão pois não se observou deformação plástica. Bolelli et al [30], discute em seu trabalho o efeito da moagem das partículas de desgaste contra o fundo da pista, o que pode, possivelmente ter acontecido neste trabalho, porém não foi possível observar com clareza de detalhes nas imagens adquiridas.

Para o revestimento de cromo duro, não ficou evidenciado um mecanismo predominante de desgaste. A análise das imagens da microscopia eletrônica sugere a ocorrência de desgaste abrasivo por microsulcamento e formação de arestas distribuída uniformemente em toda a região de contato da esfera, pois se acredita que houve deformação plástica na região desgastada, conforme Figura 8a e 8c. Como a dureza do revestimento não é da mesma ordem dos carbetos aspergidos, a maior plasticidade e ductilidade da camada podem ter gerado dobramentos e partículas de desgaste a dois e a três corpos, o que poderia ser indícios de uma remoção mecânica de material. Isto explicaria o desempenho inferior e a grande variação dos resultados, inclusive quando comparado ao material sem revestimento. Ainda assim, para confirmação e melhor compreensão dos mecanismos de desgaste envolvidos nas amostras cromadas, deveriam ser realizados estudos mais aprofundados.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 8** – Fotos da pista de desgaste obtidas pelo MEV. (a) Cromo duro com aumento de 100x; (b) WC-Co-Cr com aumento de 100x; (c) Cromo duro com aumento de 500x; (d) WC-Co-Cr com aumento de 500x.

#### 4 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma avaliação do comportamento tribológico do aço SAE 4140 revestido com WC-Co-Cr por meio de aspersão HVOF em comparação com o cromo duro eletrodepositado e com o material base do substrato temperado e revenido sem revestimento. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

a) O revestimento aspergido obteve os maiores valores de microdureza na superfície com relação ao revestimento de cromo e das amostras somente temperadas, revenidas e sem revestimento;

b) A adesão do revestimento aplicado por HVOF apresentou resultado superior ao cromo duro, porém não foi possível obter o valor da tensão máxima de aderência do revestimento, visto que em ambos os casos a ruptura ocorreu na região do material adesivo;

c) O coeficiente de atrito permaneceu praticamente constante durante a realização dos ensaios de resistência ao desgaste e seu valor ficou em torno de 0,6 para as diferentes condições de superfícies estudadas.

d) O melhor desempenho com relação aos ensaios de desgaste por deslizamento pino sobre disco foi obtido pelo revestimento WC-Co-Cr, em função da elevada dureza do revestimento e dos mecanismos de desgaste envolvidos.

## Agradecimentos

À WEG Equipamentos Elétricos S.A por fomentar esta pesquisa e contribuir com o processo de fabricação das amostras. À Rijeza Metalurgia e à Cromagem Jaraguá pelo apoio e prestação de serviço realizado através das aspersões e eletrodeposição de cromo, respectivamente. À UDESC por ceder material didático e disponibilizar seus laboratórios para execução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Houdková Š, et al. Comparative study of thermally sprayed coatings under different types of wear conditions for hard chromium replacement. Tribology Letters. 2011; 43(2): 139-154.
- 2 Bolelli G, et al. Mechanical and tribological properties of electrolytic hard chrome and HVOF-sprayed coatings. Surface and Coatings Technology. 2006; 200(9): 2995-3009.
- 3 Ibrahim A, Berndt CC. Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC–Co coatings and hard chrome plating. Materials Science and Engineering. 2007; 456(1-2): 114-119.
- 4 Bolelli G, et al. Corrosion resistance of HVOF-sprayed coatings for hard chrome replacement. Corrosion Science. 2006; 48(11): 3375-3397.
- 5 Legg KO. Hard chromium replacements, Proc. 4th Int. Chromium Colloquium Conf., Ste Etienne, France, 2004.
- 6 Souza RC, Voorwald HJC, Cioffi MOH. Fatigue strength of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr and WC-10Ni on AISI 4340 steel. Surface and Coatings Technology. 2008; 203(3-4): 191-198.
- 7 Voorwald HJC, et al., Effect of electroless nickel interlayer on the fatigue strength of chromium electroplated AISI 4340 steel. International Journal of Fatigue 2007; 29: 695.
- 8 Picas JA, et al. Tribological evaluation of HVOF thermal-spray coatings as a hard chrome replacement. Surface and Interface Analysis. 2011; 43(10): 1346-1353.
- 9 Lima CC, Trevisan R. Aspersão térmica - Fundamentos e Aplicações. Artliber Editora. São Paulo, 2007.
- 10 Schiefler MOF. Estudo microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica [tese de doutorado]. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.
- 11 AWS; American Welding Society. Thermal spraying – Practice, Theory and Application. AWS. 1985.
- 12 ASM International. ASM Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International. Washington, EUA, 2004.
- 13 Wood RJK. Tribology of thermal sprayed WC–Co coatings. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2010; 28(1): 82-94.
- 14 Sulzer Metco. The Coatings Company. Coating Materials. Disponível em: <https://www.sulzer.com/pt/Products-and-Services/Coating-Materials>.
- 15 Herman H, Sampath S. Rapid solidification and microstructure development during plasma spray deposition. Journal of Thermal Spray Technology. 1996; 5(4): 445-456.
- 16 Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Ed. John Willey & Sons Ltd, 2<sup>a</sup> ed. England. 2008.
- 17 Comeli FW. Estudo de revestimento aspergido por HVOF contra o desgaste em hastes de válvulas de turbinas termelétricas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.
- 18 Guilemany JM, et al. Studies of Fe-40Al coatings obtained by high velocity oxy-fuel. Surface and Coatings Technology. 2006; 201(5): 2072-2079.
- 19 Pawlowski, L.: The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. John Willey & Sons Ltd, England. 1995.
- 20 ASTM G 99. Standard Test Method for Wear Testing Whith a Pin on Disc Apparatus. 2005.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



- 21 ASTM C 633. Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings. 2001.
- 22 Hulka I, et al. Wear properties of CrC–37WC–18M coatings deposited by HVOF and HVAF spraying processes. *Surface and Coatings Technology*. 2012; 210: 15-20.
- 23 Lee CW, et al. A study on powder mixing for high fracture toughness and wear resistance of WC–Co–Cr coatings sprayed by HVOF. *Surface and Coatings Technology*. 2010; 204(14): 2223-2229.
- 24 Totemeier TC. Effect of high-velocity oxygen-fuel thermal spraying on the physical and mechanical properties of type 316 stainless steel. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2004; 14(3): 369-372.
- 25 Schwetzke R, Kreye H. Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high-velocity oxygen fuel spray systems. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1999; 8(9): 433-439.
- 26 Varavallo R, et al. Adhesion of thermally sprayed metallic coating. *Journal of ASTM International*. 2012; 9(2): 403-414.
- 27 Spray FT, Leahey MH. Replacement of hard chrome electroplating by tungsten carbide based high velocity oxygen [master graduation]. Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, USA. 2009.
- 28 Sahraoui T, et al. Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty). *Journal of Materials Processing Technology*. 2004; 152(1): 43–55.
- 29 Fang W, et al. Processing optimization, surface properties and wear behavior of HVOF spraying WC–CrC–Ni coating. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009; 209(7): 3561–3567.
- 30 Bolelli G, et al. A comprehensive characterization of industrially manufactured hard chrome coatings and of thermally sprayed alternatives. In: *Proceeding of the International Thermal Spray Conference ITSC 2005, Basel, 2–4 May 2005*, p. 1456–1461. DVS-Verlag, Basel, Switzerland, Düsseldorf (2005).

---

\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*