



REVESTIMENTO WC DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA (HVOF) COMO ALTERNATIVA AO CROMO DURO ELETRODEPOSITADO APLICADOS EM EQUIPAMENTOS HIDRÁULICOS

RICHARD DE MEDEIROS CASTRO¹, LUIZ CARLOS DE CESARO CAVALER²,
NORTON ZANETTE KEJELIN³, FRANCO WRONSKI COMELI⁴, ALEXANDRE DA
SILVA ROCHA⁵

¹Faculdade SATC - Engenharia Mecânica

Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos – LASPHI

Rua Pascoal Meller 73, Criciúma, Brasil

²Faculdade SATC - Engenharia Mecânica

Laboratório de Manufatura Mecânica – LAMAN

Rua Pascoal Meller 73, Criciúma, Brasil

³Petrobras, Macaé, RJ, Brasil - Engenharia de Inspeção

⁴Tractebel Energia SA – Termoelétrica Jorge Lacerda

Av. Paulo Santos Mello S/N – Capivari de Baixo/SC - CEP 88745 000 Brasil

⁵Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Grupo de Engenharia de Superfícies – GES

Av. Bento Gonçalves, 9500 – Campus do Vale – Porto Alegre – RS – Brasil

(Recibido 7 de agosto de 2014, para publicación 7 de enero 2015)

Resumo – Devido à necessidade de obtenção de uma superfície resistente ao desgaste e a oxidação, os cilindros hidráulicos são tradicionalmente revestidos com cromo duro eletrodepositado. Todavia, este tipo de revestimento apresenta uma ampliação gradual da área de apoio aos elementos de vedação e guias, interferindo diretamente na lubrificação da haste, ocasionando danos aos elementos de vedação e promovendo consequentes vazamentos. Outro apelo contrário à utilização do processo de revestimento com cromo é a presença, em elevados níveis, de cromo hexavalente Cr⁺⁶, apresentando alto poder cancerígeno e de contaminação ambiental. Atualmente, o processo de aspersão térmica em alta velocidade (HVOF - High Velocity Oxi-Fuel) se caracteriza como uma técnica de revestimento alternativa ao cromo duro, utilizando materiais compósitos (metal-cerâmico), os quais propiciam baixas taxas de desgaste. Recentes pesquisas tem mostrado que algumas propriedades mecânicas favorecem a utilização desse processo de aspersão térmica. Neste estudo fica evidenciado que as características quanto à dureza, resistência ao desgaste, rugosidade e coeficiente de atrito, dos revestimentos a base de carboneto, são superiores em relação aos revestimentos aplicados por eletrodeposição de cromo. Essas características foram analisadas pelas técnicas de microscopia ótica, ensaios de desgaste (ASTM G65 e G99), medições de rugosidade e perfilometria

Palavras-chave – Cromo duro, Aspersão térmica, HVOF, Desgaste, Cilindros hidráulicos.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, o cromo duro a mais de 50 anos, vem sendo uma prática utilizada para proteger hastes de cilindros hidráulicos contra desgaste, corrosão e para proporcionar um melhor acabamento superficial, minimizando os efeitos de fuga de óleo. Além disso, existem constantes aplicações da eletrodeposição de cromo duro nas atividades de recuperação de componentes de aeronaves comerciais e militares, chamados de processos críticos, pois nestes, altas solicitações mecânicas são exigidas [1]. Esse revestimento é usado pelos fabricantes das peças originais das aeronaves, especificamente no estrem de pouso e atuadores hidráulicos. A Fig. 1 apresenta exemplos típicos das principais aplicações dos revestimentos em cromo duro em hastes de cilindros hidráulicos.

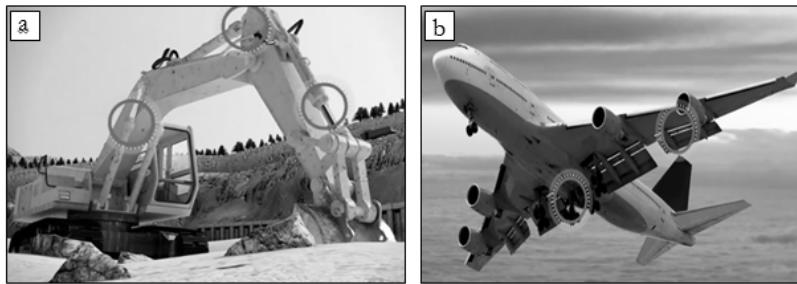


Fig. 1. Aplicação do revestimento de cromo duro em cilindros hidráulicos. (a) movimentação dos braços de uma retroescavadeira e (b) trem de pouso e flaps de aviões [2].

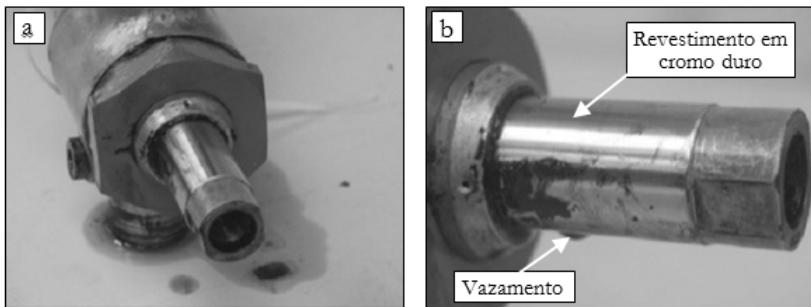


Fig. 2. (a) Cilindro hidráulico e (b) Detalhe do revestimento em cromo e do vazamento ocorrido após o cilindro hidráulico ter completado 400.000 ciclos [1].

O desgaste é um dos principais problemas encontrados nas indústrias em componentes que ficam submetidos a esforços de fricção ou ainda no caso dos sistemas óleo- hidráulicos, que dependem da eficiência de filtragem do fluido para a retenção dos particulados sólidos. Além da contaminação interna, os cilindros hidráulicos como parte integrante desses sistemas estão sujeitos à contaminação externa, pois sua haste é o elemento responsável pela ação linear da movimentação, e isso faz com que os efeitos de agentes abrasivos externos possam atuar de forma severa, através de mecanismos de desgaste abrasivo como o microcorte e/ou microsulcamento nas hastas, tendo como consequência as fugas de óleo e a perda de sua eficiência.

Existem vários processos que estão sendo avaliados e/ou aplicados como fontes alternativas para a cromagem, incluindo-se a deposição química e física de vapor (CVD - *Chemical Vapor Deposition* e PVD - *Physical Vapor Deposition*) e revestimentos com laser [3]. Os processos de aspersão térmica vêm se apresentando como técnicas promissoras na deposição de revestimentos. Estudos mostram que a técnica de asperção térmica ultrasônica (HVOF – *High Velocity Oxygen Fuel*) pode ser empregado tanto para a fabricação de novos revestimentos quanto para recuperação de hastas já usadas, apresentando um aumento considerável na vida útil dos componentes que interagem com essa superfície, como por exemplo, os elementos de vedação [10].

Há duas razões básicas por trás das atividades para substituir cromo duro como revestimento de componentes hidráulicos. O principal impulsor é a restrição sobre os níveis permitidos de cromo hexavalente (Cr^{+6}), altamente cancerígeno. Em segundo lugar, há a necessidade de uma considerável melhoria na eficiência dos componentes hidráulicos, aumentando a vida útil das vedações e hastas, devido ao aumento da resistência ao desgaste desses elementos [4]. Na Fig. 2 é representada a fuga de óleo do cilindro hidráulico quando ocorre o desgaste em vedações e hastas.

Além da resistência ao desgaste, um bom revestimento deve atender requisitos de acabamento. A eficiência de um revestimento também está relacionada com os parâmetros de rugosidade, como R_a , R_z e R_{\max} [μm] e com a área total de apoio da vedação, chamado de parâmetro R_{mr} [%] [2]. Para se obter um bom funcionamento das vedações sobre as hastas, um ótimo R_a deve ter seu valor igual a $0,2 \mu\text{m}$ e um R_{mr} de 80% [5].

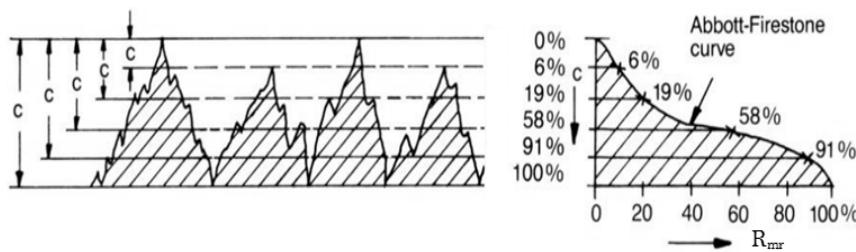


Fig. 3. Curva referente à proporção de material, NBR ISO 4287 [7].

O parâmetro R_a é média aritmética do perfil, também conhecido como CLA (*Center Line Average*) ou linha média central, e é o parâmetro de rugosidade mais usado para controle de qualidade em geral. Esse parâmetro pode ser definido como a média absoluta das alturas das irregularidades ao longo do perfil, e pode ser representado como a linha média de todo o perfil. No entanto, R_z é definido como a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade [6].

O parâmetro do perfil R_{mr} é a razão do comprimento útil do perfil de rugosidade a um dado nível de corte (c) com o comprimento avaliado, sendo o resultado representado em porcentagem. O comprimento útil, é a soma dos comprimentos das seções, obtidas pelo corte do perfil com a linha paralela a linha média a um nível (c). A razão é assumida em 0% se uma fatia do nível for ao pico mais alto, e 100% se for ao vale mais profundo (Fig. 3).

A curva de razão material representa a porcentagem de material encontrado no corte em um nível (c) distanciado do ponto mais alto do perfil. Também conhecido como a curva de Abbott-Firestone (BAC). Esta curva é a representação gráfica da variação do parâmetro razão material do perfil R_{mr} , em função de diferentes níveis “c” do comprimento avaliado [8].

Em consequência mau uso e tratamento indevido das características das superfícies dos componentes mecânicos, praticamente todos os ramos da engenharia enfrentam problemas de desgaste. Apesar de sua importância, o desgaste nunca recebe a atenção merecida, principalmente quando não é associado ao aspecto econômico. As perdas econômicas consequentes de desgastes são generalizadas e perversas, não envolvem tão somente os custos de reposição, mas também os custos de depreciação de equipamentos, perdas de produção, perda de competitividade, e perdas envolvendo a perda de oportunidades de negócios [9].

De encontro com esses problemas que afetam a economia mundial, fica evidente a necessidade da pesquisa para tentar minimizar os efeitos causados pelos mecanismos de desgaste aos componentes mecânicos de uma forma geral. Dentro do universo da engenharia, existe uma subárea de pesquisa denominada “engenharia de superfícies”, que estuda as técnicas e possibilidades para melhorar os efeitos de desgaste e fornecer uma melhor condição superficial ao componente em serviço.

O processo mais difundido e que visa principalmente suas aplicações em hastes hidráulicas é a aspersão térmica de alta velocidade (HVOF), surgida no início de 1980 com excelentes vantagens em relação aos outros processos da própria aspersão térmica e a do cromo duro eletrodepositado. Uma vantagem inerente desse processo é a sua capacidade de pulverização de partículas semifundidas a altas velocidades (cerca de 900 m/s), resultando em um revestimento bastante denso, com elevada aderência e baixos teores de óxidos [10]. A técnica é baseada em especial no projeto da tocha (pistola) de aspersão em que o combustível, geralmente propano, propileno, metil-acetileno, propadieno, hidrogênio ou querosene, é misturado com oxigênio e queimado em uma câmara de combustão onde a chama é comprimida e em seguida liberada, ocorrendo uma forte aceleração dos gases, juntamente com as partículas utilizadas em forma de pó. (Fig. 4). Nesse tipo de pistola a alimentação do pó é realizada imediatamente após a expansão dos gases que entram em combustão na câmara e saem com elevada energia cinética e térmica e transportam as partículas até o substrato a ser revestido.

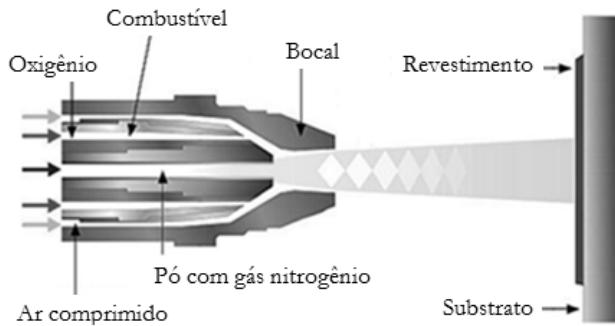


Fig. 4. Princípio de funcionamento da pistola utilizada pelo processo de aspersão térmica – HVOF [4].

Após a deposição do revestimento, dependendo da necessidade de uso do componente, um acabamento superficial é exigido. Considerando aplicações em hastes de cilindros hidráulicos, um bom acabamento superficial deve ser inferior a $0,4 \mu\text{m}$ (R_a) de rugosidade [11]. Uma vez que o processo de aspersão térmica por HVOF confere um acabamento superficial com R_a de $6,5 \mu\text{m}$, verifica-se a necessidade de um acabamento final, geralmente por processos de retificação de alta precisão, lixamento e polimento.

De acordo com recentes pesquisas desenvolvidas, as três ligas utilizadas na aspersão por HVOF que são promissoras para a substituição do cromo, em hastes dos cilindros hidráulicos são [12]:

- WC-Co, 83% carbeto de tungstênio, 17% cobalto;
- WC-Co-Cr, 86% carbeto de tungstênio, 10% cobalto, 4% cromo;
- Tribaloy 400, 28% molibdênio, 8% cromo, 2.5% silício, cobalto em equilíbrio.

Nessas pesquisas foi comparado o desgaste das hastes revestidas com as três ligas citadas. Ao final dos testes, verificou-se que os revestimentos aspergidos tiveram um comportamento muito superior ao do cromo, apresentando baixos índices de vazamentos entre haste e vedação, baixas modificações de rugosidade, redução na formação de microsulcamentos nas hastes e menor deformação nos elementos de vedação.

Com base nas pesquisas realizadas para dar suporte a estruturação e execução deste trabalho, este tem como objetivo apresentar alguns resultados e alternativa de revestimento metálico que podem ser empregado para melhorar as características das superfícies das hastes dos cilindros hidráulicos, e consequentemente ampliar a eficiência dos cilindros hidráulicos, principalmente quando submetidos a grandes esforços, grandes ciclos e ambientes hostis como é o caso da indústria aeronáutica e também da mineração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Visando-se estabelecer um comparativo quanto à microestrutura, resistência ao desgaste, coeficiente de atrito, dureza e rugosidade entre os revestimentos, foram utilizados neste trabalho os processos de eletrodeposição de cromo duro e, aspersão térmica HVOF com material de adição a base de carboneto de tungstênio (WC). Como substrato, foram fabricados corpos de prova (CP) em aço AISI 1045 de 50 mm de diâmetro, cuja composição química está apresentada na tabela 1.

Foi preparado um CP cilíndrico de 30x30 mm para a análise metalográfica e de microdureza conforme

Tabela 1. Composição química do aço AISI/SAE 1045.

Composição Química (% em peso)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,45	0,16	0,70	0,013	0,030	0,11	0,093

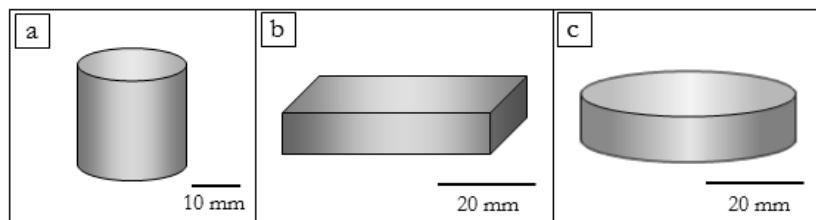


Fig. 5. Corpos de prova para os ensaios dos revestimentos.

Tabela 2. Quantidade dos corpos de prova utilizados nos ensaios de desgaste, metalografia e dureza.

Quant.	Formato dos CP e revestimentos	Ensaios/Medições
01	Cilíndrico Ø 30 x 30 mm (WC10Co4Cr)	Metalografia e Microdureza
01	Cilíndrico Ø 30 x 30 mm (Cromo duro)	Metalografia e Microdureza
05	Cilíndrico Ø 52 x 08 mm (WC10Co4Cr)	Desgaste (ASTM G99) e Perfilometria
05	Cilíndrico Ø 52 x 08 mm (Cromo duro)	Desgaste (ASTM G99) e Perfilometria
05	Retangular 11 x 13 x 52 mm (WC10Co4Cr)	Desgaste (ASTM G65) e Rugosidade
05	Retangular 11 x 13 x 52 mm (Cromo duro)	Desgaste (ASTM G65) e Rugosidade

Fig. 5(a), atendendo os requisitos superficiais exigidos para a deposição dos revestimentos. Para os ensaios de desgaste, rugosidade e perfilometria, foram feitos de acordo com a tabela 2 e representados de acordo com as figuras 5(b) e (c).

A quantidade de corpos de prova (5) foi baseada na melhoria quanto à minimização dos erros sistemáticos associados às medições, obtendo-se um valor médio de desgaste e de perfilometria com maior confiabilidade. Além disso, também foi pensado na questão mínima de ensaios, ou seja, 3 amostras. Neste caso se por algum causa eventual viesse ocorrer ainda tinham-se corpos de prova disponível para uma mínima quantidade estatística.

2.1. Aplicação do revestimento por aspersão térmica - HVOF

Para atender as especificações quanto à deposição do revestimento aspergido (ancoramento mecânico e limpeza), os substratos foram jateados com óxido de alumínio (Al_2O_3) granulometria 24 (*mesh*), conferindo um parâmetro de rugosidade (R_a) de 6,4 μm conforme descrito anteriormente na secção 1. Após estes processos os corpos de prova foram submetidos ao pré-aquecimento em temperatura máxima de 120°C.

Os revestimentos depositados pelo processo HVOF, foram fabricados utilizando-se o equipamento TAFA/PRAXAIR JP-5000 – modelo 5120, com pistola modelo JP5000. Os parâmetros de aspersão térmica e a composição química do material de adição estão expressos nas tabelas 3 e 4.

Ao término do processo de deposição do revestimento no substrato, os corpos de prova foram submetidos ao processo de acabamento, através de lixamento e polimento, conferindo uma rugosidade média ao revestimento adequada ao uso em hastes de cilindros hidráulicos.

2.2. Caracterização microestrutural dos revestimentos

Para a caracterização microestrutural dos revestimentos depositados foram utilizados os processos convencionais da Metalografia como, corte da seção transversal dos corpos de prova e o polimento da superfície a ser analisada. Também foram obtidos perfis de microdureza Vickers $\text{HV}_{0.01/15}$, através de um microdurômetro modelo HMV-02 TADW - SHIMADZU, e as imagens foram capturadas com ampliações de 200x e 500x, empregando-se um microscópico ótico, modelo BX 51M – OLYMPUS.

Tabela 3. Parâmetros da aspersão utilizados na deposição do WC-CoCr, nos CP's [13].

Descrição	Valores	Descrição	Unidades
Tamanho do canhão	152,4 mm	Pressão do oxigênio	$9,7 \pm 0,3$ bar
Distância da pistola ao corpo de prova	305 mm	Vazão do oxigênio	72,59 l/h
Taxa de alimentação	90 g/min	Pressão do querosene	$9,1 \pm 0,3$ bar
Pressão do nitrogênio	15 ± 1 bar	Vazão do querosene	23,2 l/h
Vazão do nitrogênio	$311,48 \pm 0,3$ l/h	Pressão da combustão	$7,0 \pm 0,3$ bar

Tabela 4. Composição química e propriedades do pó utilizado na aspersão [14].

Composição Química (% em peso)					Densidade (g/cm ³)	Tamanho (μm)
W	Fe	Cr	Co	C		
80,76	0,12	4,11	9,74	5,27	4,8 a 5,0	45 ± 11

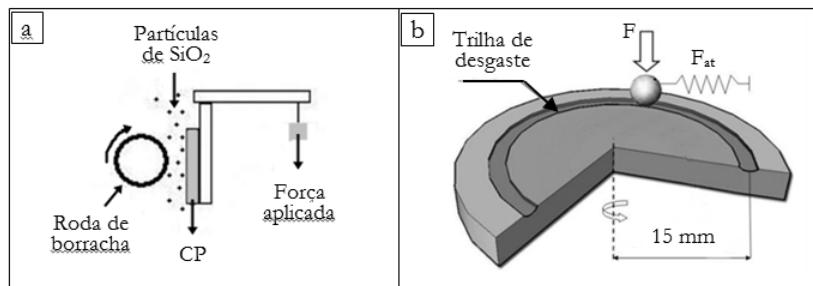


Fig. 6. Representação esquemática dos ensaios de desgaste. (a) ASTM G65 e (b) ASTM G99.

Tabela 5. Parâmetros do ensaio de desgaste (Roda de borracha).

Dados do ensaio	Valores	Dados do ensaio	Valores
Diâmetro da roda de borracha	228,6 mm	Granulometria da areia	0,212 a 0,300 mm
Tempo do ensaio	30 min	Vazão de areia (SiO ₂)	320 g/min
Rotação da roda de borracha	200 RPM	Carga aplicada	130 N

2.3. Ensaios de desgaste

Com o objetivo de caracterizar as propriedades de resistência ao desgaste foram empregadas duas técnicas distintas: ensaio de desgaste por roda de borracha e areia [15] e ensaio de desgaste pino sobre disco [16], conforme representado nas figuras 6 (a) e (b), respectivamente.

No ensaio de desgaste por roda de borracha, foram utilizados os parâmetros de acordo com a tabela 5. A resposta frente ao desgaste (perda de volume) foi obtida conforme a norma ASTM G65 (equação 1).

$$\text{Perda de volume} = \frac{\text{perda de massa (g)}}{\text{densidade (g/cm}^3\text{)}} \times 1000 [\text{mm}^3] \quad (1)$$

O ensaio de desgaste pino sobre disco foi realizado de acordo com os parâmetros apresentados na tabela 6. Os resultados experimentais desse ensaio de desgaste (perda de volume) foram determinados através de medição por perfilometria, avaliando-se o volume médio perdido em cinco perfis por CP. Além das medições de desgaste, durante o ensaio foi monitorado o coeficiente de atrito.

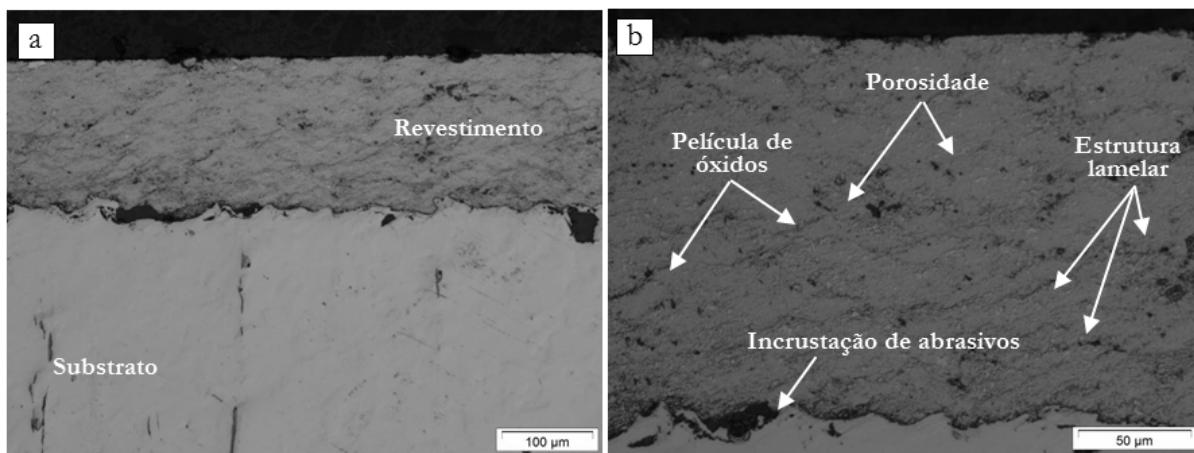


Fig. 7. Micrografias da camada aspergida com WC-CoCr por HVOF. (a) ampliação de 200x e (b) ampliação de 500x.

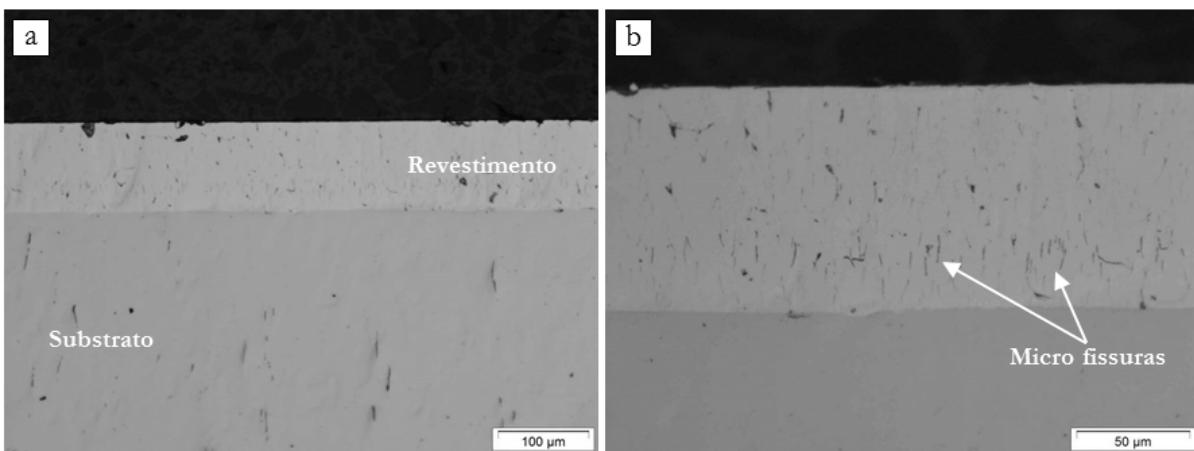


Fig. 8. Micrografias da camada de cromo duro eletrodepositado. (a) ampliação de 200x e (b) ampliação de 500x.

3. ANÁLISE E RESULTADOS

Os resultados adquiridos mediante a utilização da metodologia serão apresentados a seguir. Inicialmente são mostrados os resultados experimentais obtidos para cada CP, referente a microestrutura, em seguida o desgaste e após a comparação do coeficiente de atrito dos revestimentos.

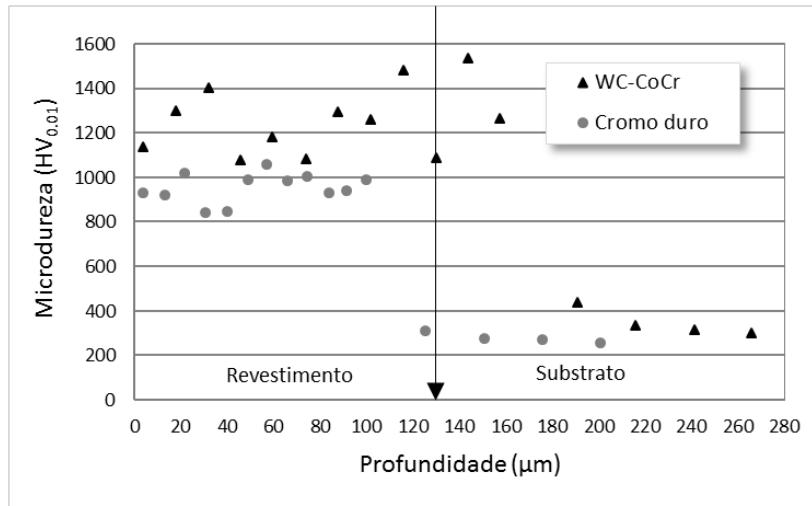
3.1. Microestrutura e dureza dos revestimentos

As figuras 7 e 8 apresentam as microestruturas obtidas após a análise por microscopia ótica dos revestimentos em estudo, WC-CoCr e cromo duro. Em relação às microestruturas encontradas nos revestimentos de WC-CoCr depositadas por HVOF, foi possível observar a característica lamelar típica de revestimentos aspergidos, contendo em seu contorno uma discreta película de óxidos. Observa-se também que houve incrustações de partículas abrasivas, oriundas do processo de jateamento, conforme evidenciado na figura 7b.

O nível de porosidade indicado na figura 7b foi avaliado segundo um *software* de análise de imagem (*Image-Tool*). Os revestimentos a base de carboneto de tungstênio apresentam-se com uma porosidade média de 1,0% com um desvio padrão de 0,26%, atestando que os parâmetros de aspersão utilizados foram adequados, em acordo com o critério especificado pelo fabricante Sulzer Metco, (porosidade média menor que 1,0%).

Tabela 7. Resultados das medidas de microdureza Vickers.

	Microdureza – seção transversal (HV_{0,01})	
	WC-CoCr	Cromo duro
Média	1256	952
Desvio padrão	154,73	66,42

Fig. 9. Perfis de microdureza (HV_{0,01}) nos corpos de prova de WC-CoCr e cromo duro.

Conforme as análises metalográficas, o revestimento de WC-CoCr apresentou espessura média de 167 μm , com desvio padrão de 7,05 μm . Por outro lado, o corpo de prova de cromo duro obteve uma espessura média de 101 μm com um desvio padrão de 3,65 μm , sugerindo que a manutenção da espessura é mais regular no processo de eletrodeposição de cromo duro.

As espessuras dos revestimentos de cromo duro aplicados em hastes hidráulicas devem estar compreendidas entre 10 a 20 μm . É importante ressaltar que grandes espessuras favorecem o deslocamento do revestimento em hastes de cilindros hidráulicos, principalmente pela flambagem, quando os vínculos de fixação dos cilindros hidráulicos são ineficientes [11].

Neste trabalho, optou-se pela utilização de espessuras de revestimentos da ordem de 100-150 μm com objetivos de: atender as condições dos ensaios de desgaste, facilitar a análise da microestrutura e obter melhores resultados quanto à dureza de cada revestimento. Os resultados de microdureza Vickers são apresentados nas tabelas 7 e 8, para os revestimentos de WC-CoCr, cromo duro e substrato.

De acordo com os valores de microdureza ao longo da seção, medidos a partir da superfície do revestimento aspergado (ponto zero do gráfico – Fig. 9), verificou-se que houve variações devido a não uniformidade das fases, enquanto no cromo duro, por se tratar de um revestimento mais homogêneo, obteve-se um menor desvio padrão. É possível observar que quando se trabalha com subcamadas, como no caso de revestimentos aspergidos, ocorre a não linearidade dos valores de microdureza, pois, cada ponto da indentaçāo pode estar localizado em microestruturas diferentes, nesse caso, carbonetos, óxidos, inclusões e a própria matriz (Fig. 8). Os revestimentos aspergidos com materiais a base de WC apresentam-se como compósitos metais-cerâmicos, sendo que os valores de microdureza encontrados estão associados a cada microconstituinte [3].

Verifica-se ainda, através da Fig. 9, que os valores de dureza do substrato são menores nos revestimentos eletrodepositados com cromo duro (275 HV) em relação aos revestimentos de WC depositados por HVOF (346 HV). Estima-se que esta significativa diferença de dureza entre os substratos esteja ocorrendo pelo processo de encruamento (oriundo do choque das partículas semifundidas do processo HVOF) ou mesmo por tēmpera localizada proveniente do elevado aquecimento.

Tabela 8. Dureza e parâmetros de rugosidade médios dos CP's aspergidos e eletrodepositado antes do ensaio (ASTM G65).

Nº dos CP's	Processo/Revestimento	Média HV _{0,01}	Parâmetros de Rugosidade			
			R _a (μm)	R _z (μm)	R _{máx} (μm)	R _{mr} (%)
11	Aspergido WC-CoCr	1190	0,018	0,314	0,571	89,96
12	Aspergido WC-CoCr		0,029	0,400	0,554	97,15
13	Aspergido WC-CoCr		0,017	0,210	0,577	89,97
14	Aspergido WC-CoCr		0,024	0,227	0,363	93,65
15	Aspergido WC-CoCr		0,025	0,253	0,338	92,13
16	Eletrodeposição - Cromo	890	0,332	1,855	2,607	44,01
17	Eletrodeposição - Cromo		0,172	1,325	1,702	74,25
18	Eletrodeposição - Cromo		0,264	1,921	3,003	41,52
19	Eletrodeposição - Cromo		0,269	2,115	2,673	56,14
20	Eletrodeposição - Cromo		0,181	0,314	0,571	89,96

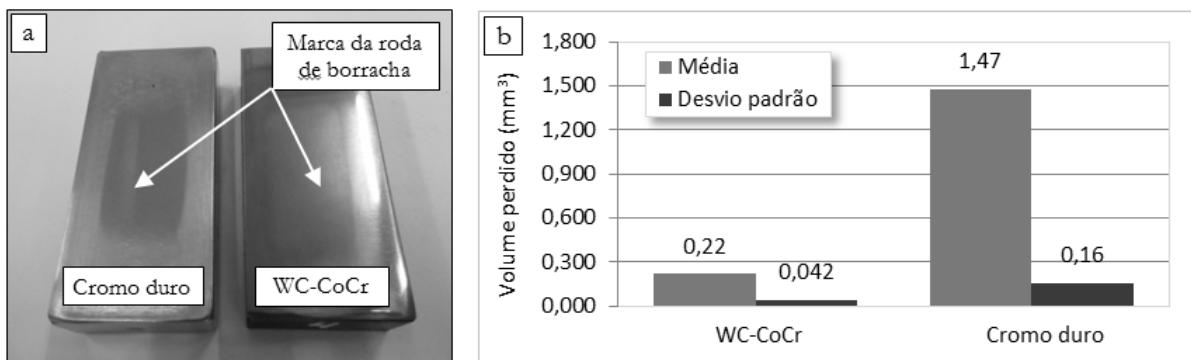


Fig. 10. Resultados do ensaio de desgaste. (a) Marcas características típicas do desgaste. (b) Comparativos do desgaste entre os revestimentos.

3.2. Ensaios de desgaste

Com o intuito de quantificar a taxa de desgaste dos revestimentos estudados, foram realizados os ensaios conforme ASTM G65 e ASTM G99.

3.2.1 Roda de borracha e areia (*Rubber Wheel*)

Verifica-se, de acordo com a tabela 8, que os valores dos parâmetros de rugosidade R_a para ambos os revestimentos estão de acordo com os valores determinados pela norma ASTM G65 (limitado em 0,8 μm). Como o âmbito da pesquisa está relacionado com as interações das superfícies de vedação em hastes de cilindros hidráulicos, o conhecimento dos outros parâmetros como, R_z, R_{máx} e R_{mr}, também serão fundamentais.

Na Fig. 10a é apresentado um corpo de prova de cada revestimento com marcas características típicas de desgaste em abrasômetro do tipo roda de borracha. Observa-se que o corpo de prova revestido com cromo duro apresenta uma condição visual de desgaste abrasivo mais acentuada em relação ao revestimento com WC-CoCr, depositado por HVOF. A Fig. 10b apresenta um comparativo entre os valores de volume perdido para os dois revestimentos. Verifica-se que o revestimento WC-CoCr apresentou um desempenho muito superior comparado ao cromo duro, resultando numa perda de volume de 0,22 mm³ contra 1,47 mm³.

Através dos valores de volume perdido em mm³, é possível estabelecer um comparativo de custo de cada processo e revestimentos utilizados para os corpos de prova retangulares como visto na Fig. 10a. A tabela 9 apresenta o resultado em R\$/volume perdido (mm³).

O custo por mm³ perdido para o revestimento WC-CoCr foi baseado na taxa de deposição do equipamento TAFA/PRAXAIR JP-5000 – modelo 5120 e o preço médio do revestimento, já para o processo

Tabela 9. Comparativo de custo (R\$) entre processos e revestimentos.

Despesas	Processos de fabricação e revestimen-	
	HVOF (WC-CoCr)	Eletrodeposição (Cromo duro)
Matéria prima	380,00	90,00
Energia	23,33	11,50
Mão de obra	80,00	25,00
Insumos	30,00	10,00
TOTAL	513,33	136,50
Custo R\$/mm³	2330,00	92,00

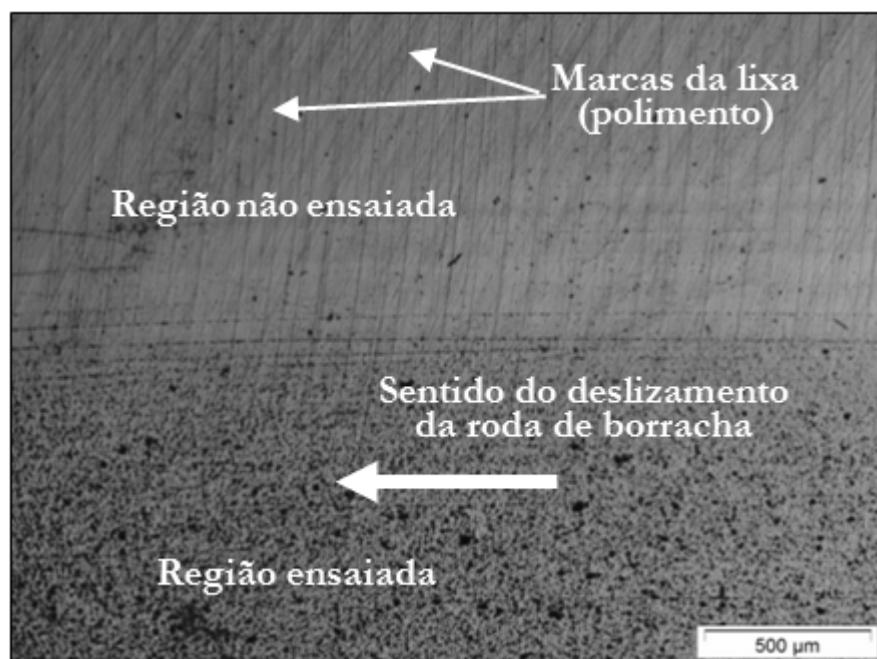


Fig. 11. Micrografia da superfície ensaiada do revestimento de WC-CoCr (ampliação de 50x).

eletrolítico foi baseado nos itens mencionados de acordo com os valores comerciais deste processo convencional. Conforme os valores obtidos para cada processo, verifica-se o elevado custo do revestimento a base de carboneto de tungstênio, ou seja, mesmo tendo um pequeno volume perdido a diferença é de 25 vezes a mais do que o revestimento a base de cromo. É importante salientar que esse pequeno comparativo não leva em consideração o quanto o revestimento WC-CoCr poderia ainda ser útil se fosse utilizado no processo. Este aspecto é perceptível pela aparência e pelos resultados de rugosidade apresentados logo a seguir.

Pela análise feita através da microscopia ótica (Fig. 11), pode-se destacar que não foi possível observar a ocorrência de nenhum mecanismo de desgaste abrasivo no sentido de deslizamento da roda de borracha apenas modificações de rugosidade foram observadas.

As medições de rugosidade após o ensaio mostraram que ocorreu um aumento dos valores de R_a , com diminuição da área de apoio superficial, com relação aos valores identificados na tabela 9, vista através do parâmetro R_{mr} , porém, mesmo com as alterações desse parâmetro, o revestimento ainda satisfaz as condições mínimas exigidas, com relação aos parâmetros de superfície (tabela 10).

Pela análise feita através da microscopia ótica do revestimento de cromo duro, Figuras 12 (a) e (b), podem-se destacar os seguintes aspectos:

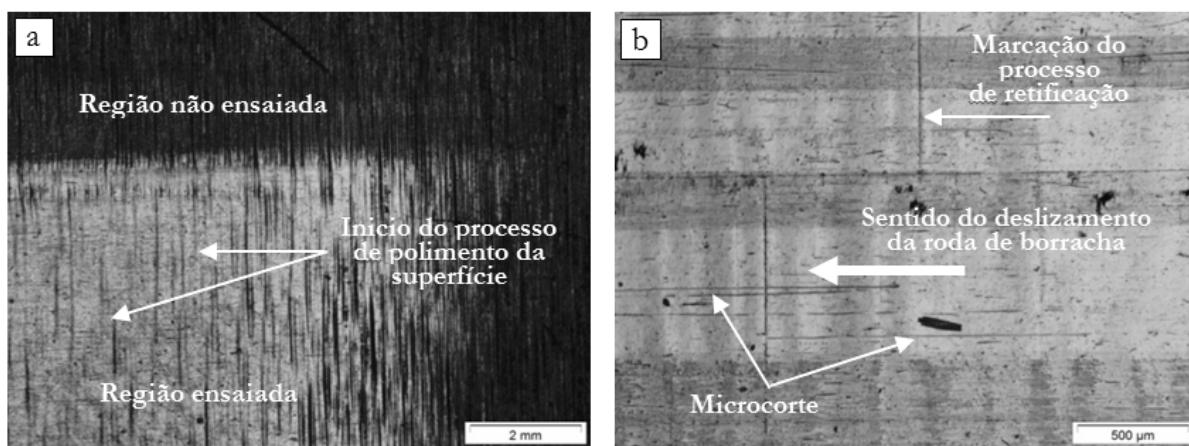


Fig. 12. Micrografia das superfícies ensaiadas do revestimento de cromo duro. (a) ampliação de 12,5x e (b) ampliação de 50x.

Tabela 10. Comparações dos parâmetros de rugosidade R_a e R_{mr} antes e após o ensaio de desgaste.

Revestimentos	Medição de rugosidade – CP's			
	Média - antes do ensaio		Média - após o ensaio	
	R_a (μm)	R_{mr} (%)	R_a (μm)	R_{mr} (%)
WC-CoCr	0,09	93,5	0,11	80,3
Cromo duro	0,15	83,6	0,26	92,1

- Foi observado o polimento da superfície que esteve em contato com a roda de borracha e o material abrasivo (SiO_2) durante o ensaio, caracterizando a baixa dureza, em relação ao revestimento de WC-CoCr (Fig. 11);
- Na Figura 12(b) foi possível identificar que no sentido de deslizamento da roda de borracha, decorrente do ensaio, há ocorrência de microcorte na superfície, como um dos mecanismos do desgaste abrasivo;
- As três regiões mais escuras em destaque, representadas na figura 12(b), são devido à falta de alimentação do material abrasivo, ocorrido em um único corpo de prova.
- Com relação aos parâmetros de superfície, o cromo duro após o ensaio, teve seus valores de rugosidade alterados: o parâmetro R_a teve seus valores reduzidos, e os valores da área de apoio (R_{mr}) ampliados, tabela 10.

Após os ensaios de desgaste, as rugosidades foram novamente medidas, com o objetivo de comparar os valores e, assim poder verificar quais das superfícies resultarão em uma melhor condição de trabalho. Com os valores fornecidos na tabela 10, é possível afirmar que após os ensaios, o revestimento em WC-CoCr apresentou um melhor desempenho com relação ao parâmetro R_a e R_{mr} , pois atenderam os melhores índices para superfícies de vedação. Já a média dos CP's de cromo duro, não obtiveram bons resultados, quanto aos valores do parâmetro R_{mr} , entretanto, para o parâmetro R_a , o revestimento em cromo apresentou-se dentro dos valores considerados bons para superfícies de vedação.

3.2.2 Pino sobre disco

A tabela 11 apresenta os valores de dureza e rugosidade dos corpos de prova, conforme Fig. 5c, antes do ensaio. Para essa condição de ensaio, os corpos de prova apresentam rugosidade (R_a), de acordo com a norma ASTM G99, que determina um valor máximo de $0,8 \mu\text{m}$.

Durante esse ensaio observou-se também a evolução dos coeficientes de atrito para os dois revestimentos, Fig. 13. O revestimento em cromo duro apresentou um coeficiente de atrito estável a partir de aproximadamente 50 segundos de ensaio, entretanto com um aumento discreto no decorrer do ensaio. No revestimento em WC-CoCr constatou-se uma tendência de estabilidade a partir de 200 segundos, com uma

Tabela 11. Condições superficiais dos corpos de prova revestidos.

Processo/Revestimento	Microdureza média ($\text{HV}_{0,01}$)	$R_a (\mu\text{m})$
Aspergido – WC-CoCr	1256	0,12
Eletrodeposição – Cromo	952	0,18

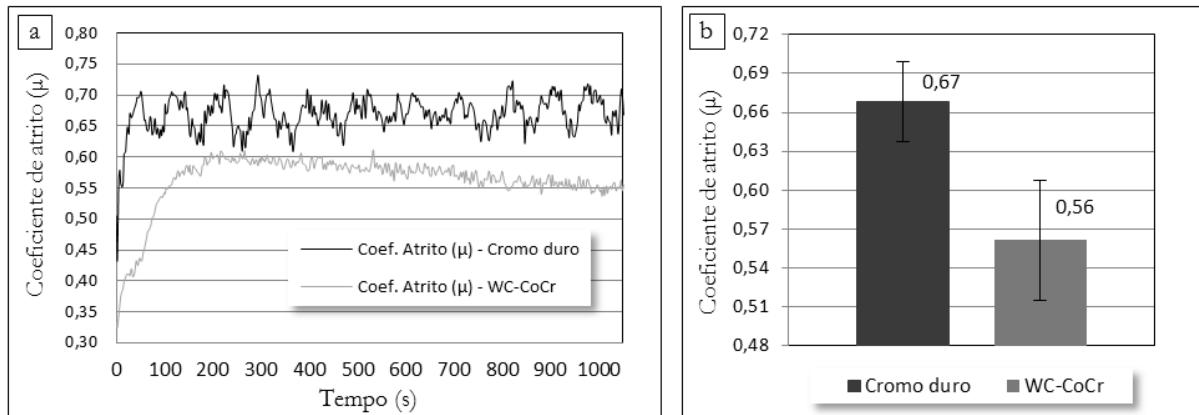


Fig. 13. Coeficientes de atrito adquiridos durante o ensaio de pino sobre disco.

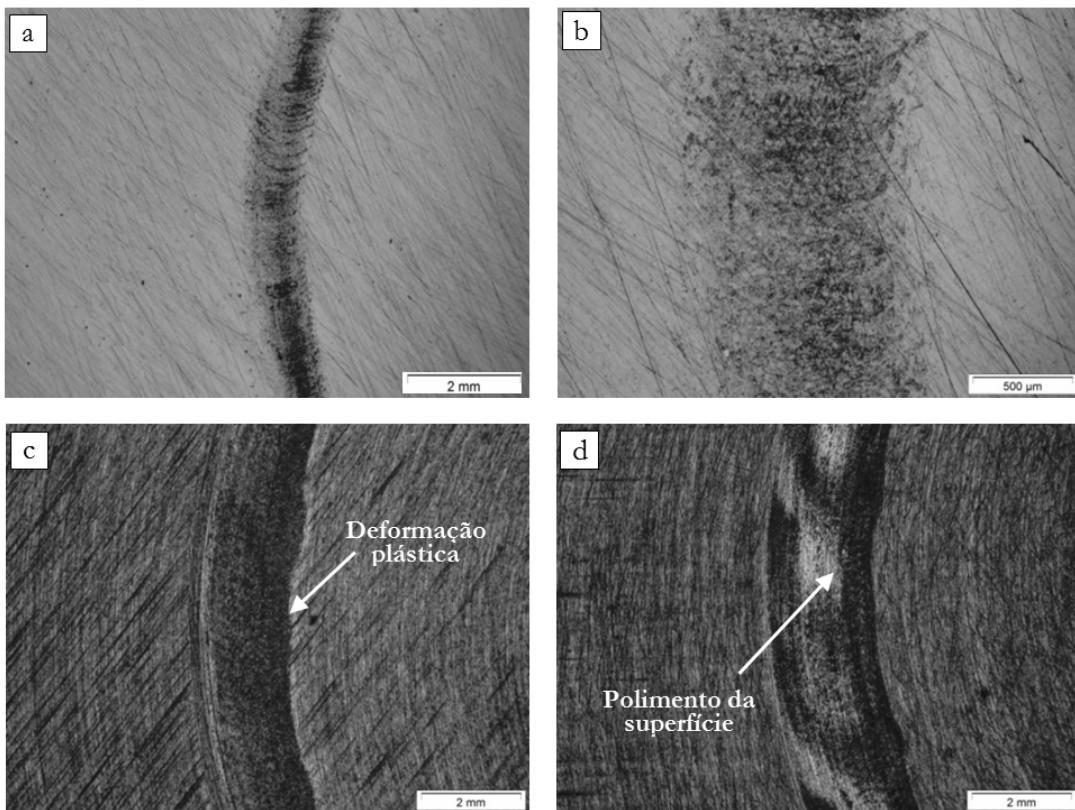


Fig. 14. Trilhas de desgaste dos revestimentos de WC-CoCr e cromo duro. (a) WC-CoCr (12,5x). (b) WC-CoCr (50x). (c) e (d) Cromo duro (12,5x).

redução discreta no coeficiente de atrito. A diferença do cromo duro em relação ao WC-CoCr pode estar relacionada com os seus maiores valores de rugosidade dos corpos de prova, associado aos mecanismos de desgaste como, deformação plástica (efeito da baixa dureza em relação ao pino) e talvez o indicativo da adesão do material da superfície e o pino. É possível talvez explicar o decréscimo do coeficiente de

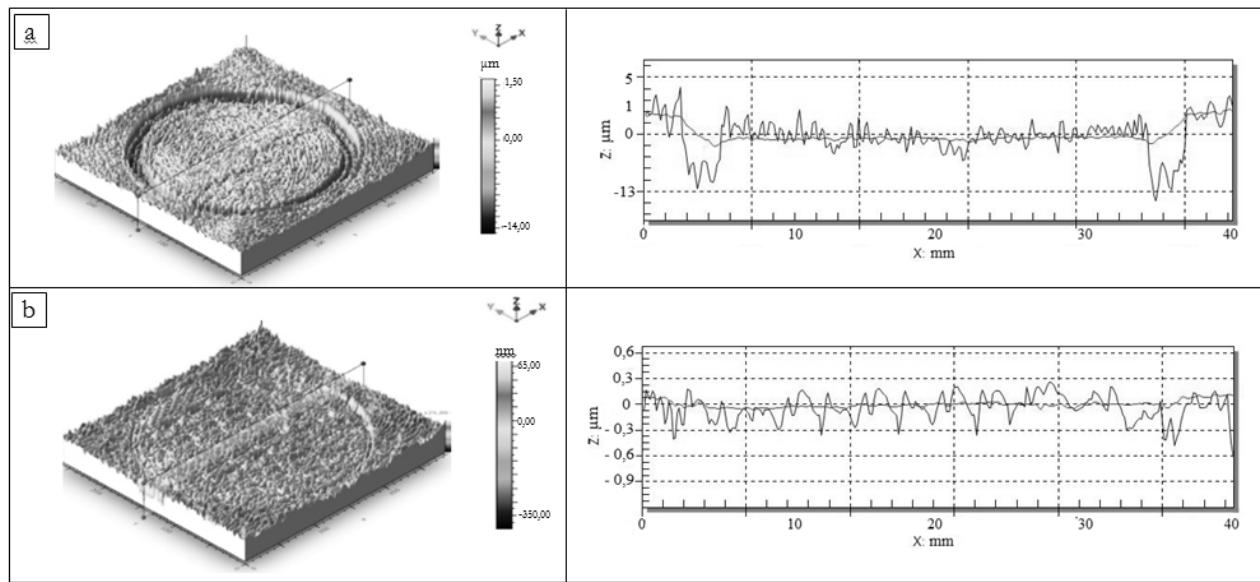


Fig. 15. Topografia 3D da superfície adquirida através do software True Map. (a) CP's revestidos em cromo duro(b) CP's revestidos em WC-CoCr.

atrito no revestimento de WC-CoCr pela formação de óxidos, que desempenham a função de lubrificantes durante o deslizamento na superfície [18].

Em ambos os revestimentos na zona de instabilidade (início do ensaio), o mecanismo de atrito é originado basicamente pelo fenômeno de adesão, a força de atrito resultante do movimento relativo entre o pino e o disco deve ser aproximadamente igual à força necessária para romper as ligações resultantes da elevada pressão local, que atua entre os picos da rugosidade [17].

A observação através da microscopia ótica das trilhas de desgaste após o ensaio (Fig. 14) também fornece algumas informações importantes nessa investigação. A primeira observação é que para o mesmo diâmetro do pino, as larguras das trilhas tiveram medidas diferentes. Esse fato, provavelmente pode estar associado à dureza que o revestimento aspergado possui com relação ao cromo e também as diferenças com relação ao coeficiente de atrito.

Outro fato que não foi perceptível no WC-CoCr trata-se dos mecanismos abrasivos, justificado pelo aumento de dureza que inibe a deformação plástica (limite de elasticidade) e o arrancamento de material da superfície, entretanto, para o cromo duro isso foi possível observar, de acordo com as medições de perfilometria. Além desse efeito, no revestimento em cromo, observa-se a ocorrência de deformação plástica, representada nas linhas claras ao redor da trilha (Fig. 14c). Para esse mesmo revestimento (Fig. 14d), a região clara da trilha mostrou-se um aspecto de polimento, característica desse revestimento quando submetido ao movimento de deslizamento.

Com as imagens de topo das superfícies, produzidas através da perfilometria 2D/3D, foi possível obter uma estimativa do volume de desgaste, pelo perfil médio de cada revestimento (figuras 15 e 16). Nessas figuras, percebe-se que a profundidade da trilha produzida pelo ensaio é muito maior nos revestimentos em cromo duro, podendo ser explicado também pelos valores superiores de volume removido.

Na Fig. 16, também é possível identificar que a média da largura da trilha nos corpos de prova revestidos em cromo duro foi de aproximadamente 2,2 mm, enquanto que para os de WC-CoCr, foi de 1,8 mm. Esse fato leva a orientação de que o revestimento cromo duro apresentou uma maior deformação plástica justificada pela menor dureza no qual foi apresentada na tabela 11. Ainda nessa figura 16 (item c) mostra a expressiva diferença da profundidade do desgaste em relação a superfície, onde para o revestimento a base de carboneto foi de -0,28 μm e para o cromo duro teve seus valores ultrapassando a 10 μm.

Esses resultados mostram uma grande diferença positiva do revestimento WC-CoCr com relação ao desgaste abrasivo, mostrando inicialmente a sua importância para esse mecanismo.

De acordo com a tabela 12, percebe-se que nos CP's aspergidos, há uma maior regularidade nos seus valores. Considerando a metodologia utilizada para a quantificação do volume perdido, o cromo duro

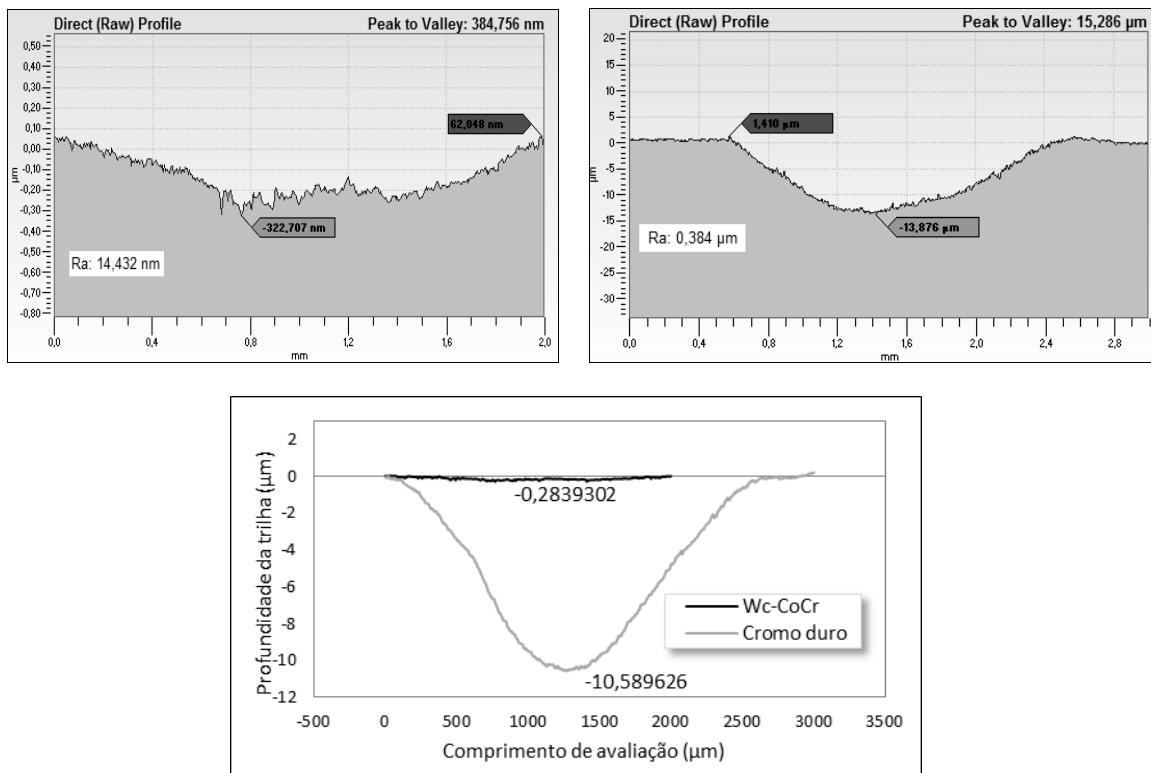


Fig. 16. Perfis de desgaste obtidos através do perfilômetro AMBIUS com auxílio do software True Surf. (a) CP 03 – WC-CoCr, (b) CP 06 – Cromo duro e (c) média dos CP's para cada revestimento.

Tabela 12. Volume perdido dos dois revestimentos quantificados por perfilometria.

Revestimentos e nº dos CP's	Volume perdido (V) – mm ³		
	Valor	Média	Desvio padrão
WC-CoCr - 01	0,0040	0,0041	0,0010
WC-CoCr - 02	0,0036		
WC-CoCr - 03	0,0044		
WC-CoCr - 04	0,0029		
WC-CoCr - 05	0,0057		
Cromo duro - 06	0,623	0,853	0,303
Cromo duro - 07	0,602		
Cromo duro - 08	1,060		
Cromo duro - 09	1,284		
Cromo duro - 10	0,692		

apresentou uma perda aproximada de 212 vezes a mais do que o revestimento de WC-CoCr, considerando a largura da trilha selecionada e o seu raio médio. É importante salientar que não foi contabilizado o efeito de deformação plástica, visto através do ensaio de perfilometria em dois pontos dos CP's de cromo duro.

De acordo com a média fornecida pela tabela 12 para os dois revestimentos, o efeito de escorregamento observado pela perfilometria no revestimento em cromo duro, pode ter interferido com uma pequena parcela no resultado final da perda de volume (média). Porém, como foram observados esse efeito em apenas dois pontos dos 25 analisados, esses dois pontos apresentaram valores reduzidos e, portanto desconsiderados.

4. CONCLUSÃO

Os resultados confirmam que o revestimento WC-CoCr, pulverizados por HVOF, é uma alternativa confiável comparado com o cromo duro eletrolítico, ou seja:

- No processo de aspersão por HVOF, foram obtidas camadas com baixos níveis de porosidade (<1,0%), com microdurezas elevadas, da ordem de 1250 HV0,01, justificando parâmetros adequados durante aspersão térmica e o controle otimizado do processo;
- Em particular, no ensaio feito conforme ASTM G65 (utilizando roda de borracha), os corpos de prova revestidos por HVOF, superaram os revestimentos por eletrodeposição. Os ensaios executados nas mesmas condições tiveram volumes perdidos de $0,22 \text{ mm}^3$ e $1,47 \text{ mm}^3$, para o WC-CoCr e o cromo duro respectivamente;
- Apesar do custo R\$/mm³ apresentar um não favorecimento do WC-CoCr, é importante salientar que essa superfície ainda poderia ser utilizada e com isso o custo deste revestimento poderia ser diminuído.
- Nas medições de rugosidade, a média dos CP's de cromo duro não obteve bons resultados, quanto aos valores do parâmetro R_{mr} , entretanto, para o parâmetro R_a , o revestimento em cromo duro apresentou dentro dos limites, adequados para superfícies de vedação;
- No ensaio executado conforme ASTM G99 (pino sobre disco), o WC-CoCr, apresentou um menor coeficiente de atrito e baixos valores de rugosidade, o que implica em um aquecimento reduzido e de dissipação de energia durante os componentes em movimento relativo, muitas vezes possibilitando operações com a lubrificação reduzida;
- Com as medições do perfil da trilha, obtidas com auxílio da perfilometria, verificou-se que principalmente a profundidade nos CP's de cromo duro foi muito superior, com relação ao WC, justificando toda a diferença obtida na perda de volume desse revestimento;
- Com a redução dos níveis de desgaste do revestimento WC-CoCr assegurado, entende-se que os componentes mecânicos revestidos por esse material, pode apresentar um tempo de operação superior ao cromo duro, em condições iguais de trabalho. Com isso o descarte e a fabricação de um novo componente torna-se reduzida.

REFERÊNCIAS

- [1] Sartwell, B.D., Legg, K.O. "Validation of HVOF Thermal Spray Coatings as a Replacement for Hard Chrome Plating on Hydraulic/Pneumatic Actuators". U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP) , Washington (2006)
- [2] Trelleborg Sealing Solution. "Hidraulic Seals / Rod Seals".Catálogo de Produtos, Suécia (2011)
- [3] Nucci, R., "Avaliação da Resistência ao Desgaste de Cermets Depositados pelo Processo de HVOF e do Cromo Duro Eletrolítico". Dissertação de Mestrado, USP - Universidade de São Paulo – Maio (2005)
- [4] Flinney, B., "Alternatives to Chrome for Hydraulic Actuators". Sealing Technology (10), 8-12 (2007)
- [5] Steep, F., Wüstenhagen, G., "Counter Surface Hydraulic Seals for Heavy Duty Applications", *Sealing Technology*, 8-9 (2006)
- [6] Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M., Eleva, I.M., Soliman, H.H., "Roughness Parameters", *Journal of Materials Processing Technology*, **123**, 123-145 (2002)
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 4287. Especificação Geométrica do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do Perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, RJ (2002)
- [8] Leach, R., The Measurement of Surface Texture Using Stylus Instrument. Measurement Good Practice Guide. Nº 37. United Kingdom (2001)
- [9] Leal, L.C., "Tribologia". Apostila, UFSC, Engenharia Mecânica, Florianópolis (2004)
- [10] Pawłowski, L., *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, (2^a ed.) John Wiley&Sons (2008)
- [11] Linsingen, I.V., *Fundamentos de Sistemas Hidráulicos*, (3ed.) Editora UFSC. Florianópolis (2008)

- [12] Degennaro, T., "Air force Evaluation of Chrome Rod Alternative Coatings", *ASTN – Aerospace Sealing Technologic News*, **11**, 3-4 (1999)
- [13] RIJEZA METALÚRGICA LTDA. Parâmetros de Aspersão Térmica – HVOF para WC-CoCr. Porto Alegre - Brasil (2011)
- [14] SULZER METCO – The Coatings Company. (s.d.). Acesso em 04 de Abril de 2012, disponível em www.sulzermetco.com
- [15] ASTM G 65-91. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, Maio (2001)
- [16] ASTM G 99-95. Standard Test Method for Wear Testing Whith a Pin on Disc Apparatus, Maio (2000)
- [17] Fang, W.C., "Processing Optimization, Surface Properties and Wear Behavior of HVOF Spraying WC–CrC–Ni coating", *Journal of Materials Processing Technology*, 3561-3567 (2009)
- [18] Cancundo, E.M., Avaliação Experimental da Condição Tribológica no Processo de Corte por Arranque de Apara. Dissertação de Mestrado, IST – Instituto Superior de Lisboa (2009)

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Rijeza Metalúrgica LTDA, pelo fornecimento dos revestimentos utilizados na aspersão térmica, a todos os “professores e colegas da UFRGS”, em especial ao GES - Grupo de Engenharia de Superfícies e a Faculdade SATC pela disponibilidade de seus laboratórios.

COATING WC DEPOSITED BY THERMAL SPRAYING (HVOF) AS AN ALTERNATIVE TO HARD CHROME ELECTROPLATED ON HYDRAULIC EQUIPMENTS

Abstract – In order to obtain a surface resistant to wear and oxidation, hydraulic cylinders are typically coated with hard chromium through electroplating process. However, this type of coating shows an increase of the area to support sealing elements, which interferes directly in the lubrication of the rod, causing damage to the seal components and promote leakage oil therefore. Another disadvantage in using the electroplated hard chromium process is the presence of high level hexavalent chromium Cr+6 which is not only carcinogenic, but also extremely contaminating to the environment. Currently, the alternative process of high-speed thermal spraying (HVOF - High Velocity Oxy-Fuel), as opposed to hard chrome coating, uses composite materials (metal-ceramic) possessing low wear rates. Research has shown that some mechanical properties are changed positively with the thermal spray process using, for electrodeposition of hard chromium for industrial applications. It is evident that coatings based on WC have characteristics such as hardness, wear resistance, roughness and friction coefficient, superior with respect to hard chrome coatings. These characteristics were analyzed by optical microscopy, wear tests (ASTM G65 and G99), roughness measurements and profilometry.

Keywords – Hard Chrome, Thermal spray, HVOF, Wear, Hydraulic cylinders.