



ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS PARA DESGASTE APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA OXICOMBUSTÍVEL DE ALTA VELOCIDADE - HVOF

Carlos Roberto Camello Lima

UNIMEP- Univ. Metodista de Piracicaba, Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção
crclima@unimep.br – Santa Bárbara d’Oeste, SP, Brasil

Flávio Camargo

OGRAMAC – Indústria e Comércio Ltda

ogramac@ogramac.com.br, Santo Antônio de Posse, SP, Brasil

***Resumo.** Uma das mais eficientes e econômicas formas de se adequar peças e componentes de equipamentos industriais a uma aplicação específica tem sido, há longo tempo, a aplicação de revestimentos. Revestimentos vêm ganhando evidência, ano após ano, em aplicações contra desgaste, contra corrosão, entre outras. Os revestimentos podem ser efetuados por diversas técnicas e processos, sendo que, para aplicações de proteção contra desgaste, a galvanoplastia e a soldagem têm sido tradicionalmente utilizadas. A aspersion térmica vem crescendo em termos de utilização nos anos recentes e conquistando espaço em aplicações tradicionais da soldagem. Neste trabalho é feito um estudo e caracterização de revestimentos à base de carboneto de tungstênio aplicados por dois equipamentos de aspersion térmica a chama oxicomustível de alta velocidade (HVOF). São avaliadas as respectivas microestruturas, dureza, bem como as características de resistência ao desgaste dos revestimentos obtidos. Os resultados mostram que os revestimentos apresentam ótimas características e podem ser aplicados, com sucesso, em diversas situações.*

***Palavras-chave:** Revestimento, Aspersion Térmica, Carbonetos, HP-HVOF, Desgaste*

1. INTRODUÇÃO

O uso de revestimentos duros para melhorar a resistência ao desgaste de componentes mecânicos tem sido comum há várias décadas, com variadas técnicas de aplicação, que incluem soldagem, “cladding”, eletrodeposição, PVD (deposição física de vapor), CVD (deposição química de vapor), sendo a aspersion térmica a técnica que mais tem se desenvolvido nos últimos anos, apresentando-se como alternativa, economicamente viável, em relação aos demais processos comumente utilizados (Tucker, 1998; Huchin, 1998; Lima *et al*, 1998).

Três tipos básicos de desgaste são geralmente considerados (Tucker, 1998): desgaste *abrasivo*, que ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície em relação à qual estão em movimento, provocando deslocamento ou remoção de material; desgaste *adesivo* onde duas superfícies em contato por atrito sofrem deformação plástica

localizada, ocorrendo uma soldagem local entre as asperezas; e desgaste *erosivo*, que resulta da colisão de partículas sólidas ou gotas de líquidos carregadas por um fluido contra uma superfície. Revestimentos de diversos tipos podem ser usados para efetivamente combater todos os três tipos, incluindo situações onde o desgaste é combinado com corrosão, quer à temperatura ambiente, quer a altas temperaturas. A análise para escolha do revestimento ideal e do processo de aplicação deve levar em conta fatores de custo e eficiência a médio e longo prazos, tendo em vista as limitações e especificidades de cada processo. Por exemplo, o componente a ser revestido pode ser grande demais para ser revestido em uma câmara de PVD ou CVD, ou apresentar outras restrições geométricas ou térmicas a estes processos (Tucker, 1998).

Dentre os processos de aspersão térmica, utilizados para aplicar revestimentos resistentes ao desgaste, o processo de aspersão oxicomustível de alta velocidade, conhecido como HVOF (High Velocity Oxi Fuel) tem sido um dos mais utilizados, principalmente na aplicação de carbonetos (Browning, 1999). O processo é baseado em um sistema de combustão interna de alta pressão, similar a um motor de foguete em miniatura. Combustível e oxigênio são misturados para produzir um jato de gás supersônico acima de 2000 m/s e 2800 °C (Thorpe *et al.*, 2000). Os combustíveis usados incluem querosene, hidrogênio, propileno, propano, acetileno, metil-acetileno propadieno e gás natural. O material em forma de pó é introduzido na chama quente dentro do cano de saída da pistola. Os revestimentos produzidos apresentam maior dureza, adesão ao substrato, durabilidade e maior possibilidade de espessuras do que os revestimentos produzidos por outros processos de aspersão térmica. Um vantagem inerente do processo HVOF é sua habilidade de aspergir partículas semi-fundidas a altas velocidades (em torno de 900 m/s), resultando um revestimento bastante denso, com alta adesão ao substrato e baixo conteúdo de óxidos. Carbonetos superaquecidos podem se decompor e formar fases menos benéficas ao revestimento. O processo HVOF é bastante efetivo ao acelerar bastante as partículas sem excesso de aquecimento.

Carbonetos de vários tipos são especialmente adequados para aplicação por HVOF, pois não requerem significativa fusão para se depositar e formar uma superfície efetiva contra desgaste. Composições típicas estão entre 8 a 30 % de conteúdo da liga matriz, que serve primariamente como ligante para as partículas de carboneto (Thorpe *et al.*, 2000). Uma das ligas mais usadas para aplicações de desgaste tem sido a liga WC-Co (Korpiola & Vuoristo, 1996), às vezes ligada a outros elementos como Ni e Cr, no intuito de oferecer melhores características de resistência à corrosão e desgaste combinados (Berger *et al.*, 1996).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram aplicados revestimentos à base de WC-Co através de dois tipos de equipamentos: um equipamento de aspersão oxicomustível de alta velocidade e alta pressão HP-HVOF convencional, modelo JP-5000 (Tafa, Inc., Concord, NH, USA) e um equipamento oxicomustível de alta velocidade e alta pressão para uso “no campo” HP-HVOF, modelo TJ-4000 (Tafa, Inc., Concord, NH, USA). O material utilizado para aplicação foi um pó de WC-12%Co (1342-VF, TAFSA, Inc., Concord, NH, USA), cujas características estão apresentadas na Tabela 1. As condições e parâmetros específicos de aplicação, para cada equipamento, são apresentados na Tabela 2. Os revestimentos foram aplicados sobre substratos de aço baixo carbono. Todas as amostras sofreram desengraxamento e jateamento abrasivo com óxido de alumínio (# 60), antes do início do processo de aspersão. A espessura média de aplicação dos revestimentos foi de 0,5 mm (500 µm). As amostras, com dimensões de 20 x 80 x 4,54 mm e Ø 25 x 25 mm, foram montadas em um carrossel, girando a 80 rpm, mantendo-se a pistola de aspersão a uma distância fixa, com deslocamento vertical na velocidade de 0,5 m/min. Para efeito de

resfriamento das amostras, foi utilizado um jato de ar comprimido direcionado para a parte posterior do carrossel. A temperatura das amostras foi medida durante a deposição dos revestimentos através de um pirômetro ótico, não se permitindo que a mesma ultrapassasse 150 °C, pela interrupção da aplicação combinada ao resfriamento por ar comprimido.

Tabela 1. Características do pó utilizado no processo HP-HVOF

Composição química (% peso)	Carboneto de Tungstênio (WC) 88	Cobalto (Co) 12	Outros 0
Tamanho da partícula (µm)	- 44 (-325 mesh)		
Formato da partícula	Basicamente esférica		
Processo de fabricação	Aspergido (Spray dried) e sinterizado		
Densidade Aparente (g/cm ³)	3,9		

Tabela 2. Parâmetros de aplicação utilizados no processo HP-HVOF

	JP5000	TJ4000		JP5000	TJ4000
Comprimento canhão (mm)	200	80	Fluxo de arraste pó (slpm)	10,6	6,1
Distância aspersão (mm)	380	200	Pressão de combustão (psi)	106 ± 5	100 ± 5
Taxa de aspersão (g/min)	76	61,2	Pressão de oxigênio (psi)	143 ± 10	300
Fluxo de oxigênio (slpm)	944	472	Pressão do combustível (psi)	125 ± 10	90 ± 10
Fluxo querosene (slpm)	0,378	0,23	Pressão gás arraste (N) (psi)	50	22

As amostras executadas foram avaliadas quanto à rugosidade, micro e macrodureza, resistência adesiva e resistência ao desgaste. A rugosidade das superfícies aspergidas foi avaliada através de um rugosímetro modelo SurfTest 301 da Mitutoyo (Mitutoyo, Japan). As medidas de microdureza Vickers foram realizadas com uma carga de 1000 g, realizando-se média de 10 leituras por amostra. As medidas de macrodureza Vickers foram realizadas com carga de 15 kg, também com média de 10 leituras por amostra.

As medidas de resistência ao desgaste foram realizadas através do ensaio de Abrasão a Três Corpos, de acordo com a norma ASTM-G-65-85 (ASTM, 1985), procedimento B. O abrasivo utilizado foi areia de quartzo arredondada, conforme especificações da norma. As características do ensaio estão apresentadas na Tabela 3. Foram realizadas, ainda, análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV, Modelo JXA-840-A-JEOL) das microestruturas dos revestimentos executados, bem como das superfícies de desgaste obtidas após o ensaio de abrasão. Análises por espectrometria de energia dispersiva (EDS) complementaram estas avaliações.

Tabela 3. Características do ensaio de abrasão ASTM-G-65-85

Fluxo de areia (g/min)	250
Velocidade da roda de borracha (rpm)	200
Carga aplicada (N)	130
Total do teste (revoluções)	2000
Tamanho das amostras (mm)	20x 80 x 4,54
Espessura média dos revestimentos (µm)	500

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das medições de rugosidade são apresentados na Tabela 4. Como pode ser observado, o nível de rugosidade pode ser considerado baixo, não havendo variação significativa entre as amostras com revestimentos executados pelos dois diferentes equipamentos. De acordo com o fabricante do pó utilizado, a rugosidade superficial esperada do revestimento, como aspergido, seria 3,25 µm em Ra, para uma espessura de 2 mm. Como

nesta aplicação a espessura da camada é de apenas 0,5 mm, a rugosidade está acompanhando o perfil obtido pelo jateamento abrasivo executado com óxido de alumínio. As medidas de micro e macrodureza são apresentadas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 4. Medidas de rugosidade superficial (Ra)

Amostra	JP-5000 (μm)	TJ-4000 (μm)
1	5,23	4,32
2	5,55	5,22
3	4,89	5,72
4	4,91	5,11
5	5,37	5,30
6	5,86	5,22
Média (x)	5,30	5,14
Desvio Padrão (σ)	0,343	0,417

Tabela 5. Resultados de medidas de microdureza Vickers (HV_{1000}) (kg/mm^2)

Medida	JP-5000	TJ-4000	Medida	JP-5000	TJ-4000
1	1235	867	6	1318	1159
2	1090	867	7	1159	1235
3	1090	915	8	1159	1090
4	1090	1159	9	1411	1235
5	1090	968	10	1159	1235
Média (x)				1180,1	1073
Desvio Padrão (σ)				104,47	146,51

Tabela 6. Resultados de medidas de dureza Vickers (HV) (kg/mm^2)

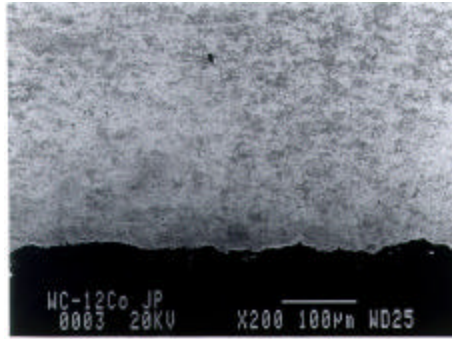
Medida	JP-5000	TJ-4000	Medida	JP-5000	TJ-4000
1	791	812	6	791	791
2	812	835	7	750	791
3	791	812	8	750	791
4	812	770	9	791	812
5	770	770	10	791	791
Média (x)				784,9	797,5
Desvio Padrão (σ)				20,76	19,28

Os resultados de microdureza são, basicamente, similares para os dois sistemas estudados, apresentando valores elevados, condizentes com o tipo de material aplicado. É importante observar que as medidas foram executadas em amostras polidas, com carga de 1000 g, no intuito de facilitar a leitura das diagonais impressas. Em geral, quando se aumenta a carga nos ensaios de microdureza com indentador piramidal de diamante, tende-se a reduzir os valores obtidos, os quais seriam maiores nas leituras com carga de 200 ou 300 g, por exemplo, tradicionalmente utilizadas (Legoux *et al.*, 2000, Khan & Clyne, 1996).

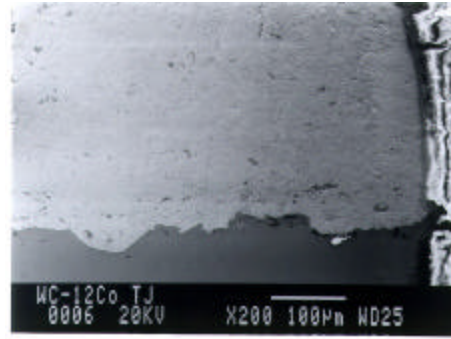
As medidas de dureza Vickers executadas apresentam, também, valores bastante elevados e similares para os dois sistemas, com uma variação média de menos de 2 %.

Os ensaios de adesão foram realizados em conformidade com a norma ASTM-C-633-79 (ASTM, 1979), utilizando-se um adesivo epoxi, Scotch Weld DP-460, branco (3M, Campinas, SP), cuja resistência à tração é de, aproximadamente, 32 MPa. Sabendo-se que os revestimentos obtidos por HVOF superam a faixa de 68 MPa no ensaio de resistência à tração (Schwetzke & Kreye, 1999; Debarro, 1997), o teste realizado foi considerado apenas como uma verificação da qualidade de aplicação e preparação superficial. Todos os corpos de prova testados romperam no adesivo, na faixa de 28 a 32 MPa, o que, pela norma, invalida o teste.

A análise microestrutural, realizada por microscopia ótica e de varredura, evidenciou a similaridade entre as microestruturas dos revestimentos realizados com os dois equipamentos, tanto em termos de morfologia, como quanto à densidade. As Figuras 1 e 2 são representativas dos revestimentos executados com os dois equipamentos. Pode-se perceber, na Fig. 1, muito baixa porosidade e na Fig. 2, uma distribuição uniforme do WC (fase clara) na matriz metálica, bem como nenhuma evidência significativa de dissolução de carbonetos.

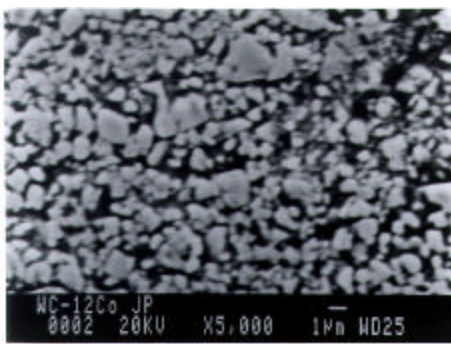


(a) JP-5000

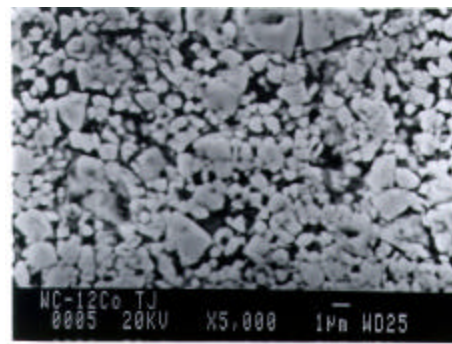


(b) TJ-4000

Figura 1. Vista da seção transversal do revestimento WC-12%Co



(a)



(b)

Figura 2. Microestrutura do revestimento WC-12%Co - (a) JP-5000, (b) TJ-4000

Os resultados do ensaio de abrasão a três corpos, realizado em conformidade com a norma ASTM-G-65-85, são apresentados na Tabela 7.

Os resultados de perda de massa, obtidos no ensaio de desgaste por pesagem direta em balança de precisão (0,001 g), foram normalizados para perda de volume, de acordo com a seguinte equação (ASTM, 1985):

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

Ainda, de acordo com a norma, tendo em vista o desgaste da roda de borracha durante os testes, que neste estudo foi de 1 mm no raio, foi realizado um ajuste no valor calculado pela Equação (1), como segue:

$$\text{Perda de volume (mm}^3\text{)} = \text{Perda de volume} \times \frac{228,6}{226,6} \quad (2)$$

(corrigida)

Tabela 7. Resultados do ensaio de abrasão a três corpos – ASTM-G-65

Amostra	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)	Amostra	Perda de Massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
JP-1	0,054	3,83	TJ-1	0,058	4,12
JP-2	0,061	4,33	TJ-2	0,055	3,90
JP-3	0,064	4,54	TJ-3	0,065	4,61
JP-4	0,056	3,97	TJ-4	0,059	4,19
JP-5	0,051	3,62	TJ-5	0,055	3,90
JP-6	0,065	4,61	TJ-6	0,063	4,47
JP-7	0,057	4,04	TJ-7	0,060	4,26
JP-8	0,053	3,76	TJ-8	0,064	4,54
JP-9	0,056	3,97	TJ-9	0,061	4,33
Média JP	0,057	4,07	Média TJ	0,060	4,26
Dpadrão (σ)	0,0045	0,326	Dpadrão (σ)	0,0034	0,243

O valor de densidade para a camada de revestimento de carboneto de tungstênio (WC12%Co) foi considerado 14,2 g/cm³, baseado nos valores de propriedades físicas do mesmo material obtido por metalurgia do pó (Berger *et al*, 1996). Pela observação dos valores da Tabela 7, pode-se constatar a similaridade dos resultados obtidos para os dois sistemas em estudo, com uma variação média de menos de 5 %. A microestrutura e morfologia dos revestimentos avaliados, bem como os valores de rugosidade e de dureza superficial obtidos, sugerem um comportamento similar para os dois sistemas no ensaio de desgaste, comprovados pelos resultados.

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, os padrões de desgaste obtidos nos ensaios de abrasão a três corpos, e sua microestrutura, avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise dos elementos foi realizada por energia dispersiva (EDS).



Figura 3. Padrões gerais de desgaste no ensaio de abrasão (50% do tamanho original)

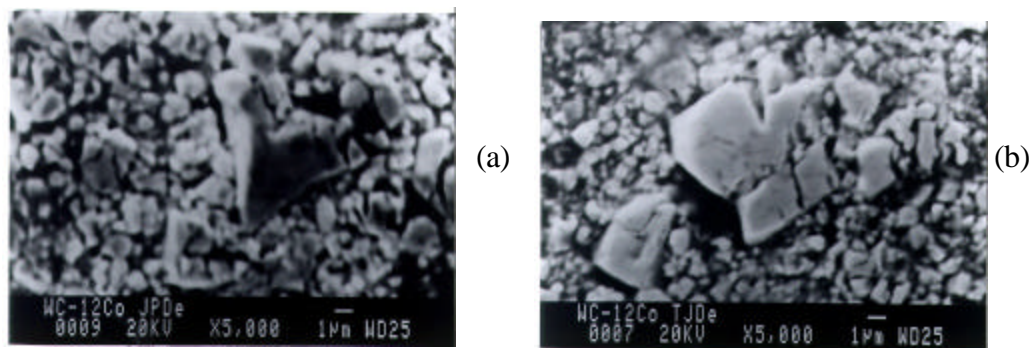


Figura 4. Padrões de desgaste no ensaio de abrasão: (a) JP-5000 - (b) TJ-4000

Pela análise da Figura 4, percebe-se que houve um maior desgaste da matriz metálica, evidenciado pelos “sulcos” entre as partículas de carboneto e pelos resultados de espectrometria. Desta forma, além do desgaste abrasivo da matriz de cobalto, parece haver um desprendimento de algumas partículas de carboneto, influenciando no desgaste de maneira erosiva, mais que abrasiva. Estas partículas desprendidas estão na faixa de 1 a 5 μm , coincidente com o tamanho das partículas de formação do pó utilizado, mostrada na Figura 5. É importante, ainda, ressaltar que os valores de resistência obtidos no ensaio de desgaste são bastante elevados (baixo valor de perda de massa), podendo-se esperar bom desempenho destes revestimentos em aplicações sujeitas ao desgaste abrasivo. Os revestimentos de WC-12%Co aspergidos por HVOF apresentaram, em ensaios similares, uma taxa média de desgaste de 20 % em relação à taxa obtida para cromo duro (Irons *et al.*,1996; Heath & Dumola, 1998).

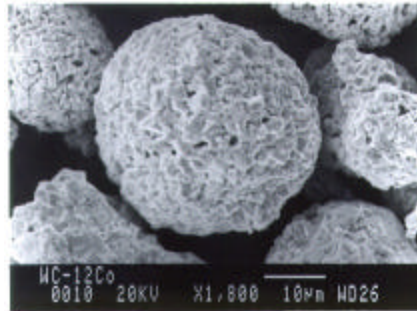


Figura 5 . Fotomicrografia do pó de WC-12%Co utilizado

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no presente estudo, permitem as seguintes considerações:

- A aplicação de revestimentos de WC-12%Co por dois diferentes equipamentos de aspersão térmica oxicombustível de alta pressão e alta velocidade (HP-HVOF), JP-5000 e TJ-4000, apresentou resultados similares quanto à micro e macrodureza, microestrutura, rugosidade superficial e desgaste por abrasão.
- Análises mais aprofundadas quanto à microestrutura e padrões de desgaste, realizadas por microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de energia dispersiva, mostraram que não há evidência de dissolução de carbonetos em nenhum dos revestimentos obtidos.
- Mesmo não sendo aqui realizado qualquer estudo quanto ao custo final dos revestimentos para cada um dos equipamentos, é importante ressaltar a possibilidade de obtenção de vantagens com o equipamento, TJ-4000, tendo em vista o consumo significativamente menor de oxigênio e combustível. De qualquer forma, outros fatores, tais como taxas de deposição e consumo de energia, devem ser melhor avaliados para tal comparação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à TAFE, na pessoa do Eng. André O’Czerny, pela doação dos pós aqui utilizados, e à Profa. Dra. Lauralice de Campos F. Canale, da EESC-USP, por ceder o equipamento e instalações para a realização dos ensaios de desgaste.

REFERÊNCIAS

ASTM - American Society for Testing and Materials, 1979, Designation ANSI/ASTM-C-633-Standard Test Methods for Adhesion or Cohesive Strength of Flame Sprayed Coatings, Philadelphia, PA, USA.

- ASTM - American Society for Testing and Materials, 1985, Designation G-65-Standard Practices for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests, Philadelphia, USA.
- Berger, L.M., Vuoristo, P., Mantyla, T., Kunert, W., Lengauer, W. & Ettmayer, P., 1996, Microstructure and properties of WC-Co-Cr coatings, Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, C.C Berndt Editor, ASM Intl., Ohio, USA, pp. 97-106.
- Browning, J. A., 1999, Viewing the future of high-velocity oxifuel and high-velocity air fuel thermal spraying, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 8, n. 3, pp.351-356.
- Debarro, J.A., 1997, Se han hecho inservibles las capas de cromo duro? Sulzer Technical Review, n.1, Sulzer Management S/A, pp. 20-23.
- Huchin, J.P., 1998, The place of thermal spraying in industry today and the prospects for the future, Proceedings of the 15th ITSC, May 25-29, Nice, France, vol. 2, pp. 925-931.
- Irons, G., Kratochvil, W., Schroeder, M. & Brock, C., 1996, Thermal spray alternatives for electroplated chromium, Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, C.C Berndt Editor, ASM Intl., Ohio, USA, pp. 39-47.
- Khan, M.S.A. & Clyne, T.W., 1996, Microstructure and abrasion resistance of plasma sprayed cermet coatings, Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, C.C Berndt Editor, ASM Intl., Ohio, USA, pp. 113-122.
- Korpiola, K. & Vuoristo, P., 1996, Effect of HVOF gas velocity and fuel to oxygen Ratio on the wear properties of tungsten carbide coating, Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, C.C Berndt Editor, ASM Intl., Ohio, USA, pp. 177-184.
- Legoux, J.G., Arsenault, B., Moreau, C., Bouyer, V. & Leblanc, L., 2000, Evaluation of four high velocity thermal spray guns using Wc-10Co-4Cr cermets, Thermal Spray: surface engineering via applied research, Proceedings of the 1st. International Thermal Spray Conference, C.C.Berndt Editor, 8-11 May, Montreal, CA, pp. 479-486.
- Lima, C.R.C., Camargo, F., Marques, P.V., 1998, Estudo comparativo das propriedades de revestimentos à base de cobalto (stellite) aplicados por soldagem e por aspersão térmica, Anais do XXIV ENTS- Tecnologia de Soldagem, Set. 20-23, Fortaleza, CE, p. 1-9.
- Schwetzke, R. & Kreye, H., 1999, Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high-velocity oxygen fuel spray systems, Journal of Thermal Spray Technology, vol.8, n.3, pp.433-439.
- Thorpe, R., Kopech, H. & Gagne, N., 2000, HVOF thermal spray technology, Advanced Materials and Processes, vol. 157, n. 4, pp.27-29.
- Tucker, R. C., 1998, An overview of alternative coatings for wear and corrosion resistance. Proceedings of the 15th ITSC-, May 25-29, Nice, France, vol. 1, pp. 103-107.

STUDY AND CHARACTERIZATION OF HIGH VELOCITY OXI FUEL THERMAL SPRAYED COATINGS FOR WEAR RESISTANCE

***Abstract.** Since a long time coatings have been used as an efficient and economic way of adapting components of industrial equipment to a specific application. The importance and demand for coating protection has significantly increased in recent years, mainly for wear and corrosion applications. Coatings can be deposited by several techniques and processes. For wear applications electroplating (hard chrome) and welding (hard facing) have been traditionally used. However, the use of thermal spray has increased in the last years, including traditional applications of that processes. In this work a study and characterization of tungsten carbide based coatings were carried out. The coatings were applied by high velocity oxi fuel thermal spraying (HVOF), using two different HVOF systems. Microstructure, hardness, as well as wear characteristics of the coatings were evaluated. The results show that the obtained coatings present great characteristics and can be successfully applied in several wear conditions.*

Keyword: *Coatings, Thermal Spray, Tungsten Carbide, HP-HVOF, Wear.*