

# ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS POR DIFERENTES PROCESSOS SOBRE AÇO CARBONO<sup>1</sup>

*Carlos Roberto Camello Lima<sup>2</sup>  
 Bianca Vieira Bette<sup>3</sup>  
 Rodolfo Libardi<sup>4</sup>  
 Flavio Camargo<sup>5</sup>  
 Valtair Antônio Ferraresi<sup>6</sup>*

## Resumo

A grande maioria dos materiais utilizados em aplicações que requerem elevada resistência ao desgaste sofre, também, ação corrosiva em função do meio em que opera. Os danos causados pela combinação de ambos os processos, direta ou indiretamente, sobre os materiais de que são produzidos os elementos de máquinas causam enormes prejuízos econômicos no meio industrial, em geral. Revestimentos duros são amplamente utilizados como solução de engenharia para o aumento da vida de componentes operando em situações de desgaste e mesmo desgaste conjugado com corrosão. As principais técnicas de aplicação de tais revestimentos são a soldagem e a aspersão térmica. Dependendo dos requisitos ambientais e de serviço, uma tecnologia de aplicação específica e um conjunto de materiais e condições apropriadas podem ser selecionados. Neste trabalho, é realizado um estudo para avaliar e comparar as propriedades de revestimentos obtidos por meio de aspersão térmica HVOF ou Arco Arame e por soldagem MIG, usando materiais de alimentação selecionados, constituídos principalmente de elementos como tungstênio e cobalto. As características mecânico-metalúrgicas e o desempenho em ensaios de corrosão e desgaste são discutidos e comparados.

**Palavras-chave:** Aspersão térmica; Soldagem; Desgaste; Corrosão.

## ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF HARD COATINGS APPLIED BY DIFFERENT PROCESSES ON CARBON STEEL

### Abstract

The majority of materials used in applications that require high wear resistance suffer also corrosive action depending on the environment in which it operates. The damage caused by the combination of both processes, directly or indirectly, on the materials that machine elements are produced lead to huge economic losses in industry in general. Hard coatings are widely used as engineering solution to increasing the life of components operating in situations of even wear and wear conjugated to corrosion. The main techniques for applying such coatings are welding and thermal spray. Depending on the environmental and service requirements, a specific application technology and a set of materials and appropriate conditions can be selected. In this work, we conducted a study to evaluate and compare the properties of coatings obtained by HVOF or wire arc thermal spraying as well as MIG welding using selected feedstock mainly consisting of elements such as tungsten and cobalt. Mechanical and metallurgical characteristics and performance on corrosion and wear tests of are discussed and compared.

**Key words:** Thermal spray; Welding; Corrosion; Wear.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68<sup>o</sup> Congresso ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutor em Engenharia Mecânica. Prof. Titular, Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), São Paulo, Brasil.*

<sup>3</sup> *Aluno do Curso de Engenharia Química, UNIMEP, São Paulo, Brasil.*

<sup>4</sup> *Doutor em Engenharia Mecânica. Prof. Doutor da UNIMEP, São Paulo, Brasil.*

<sup>5</sup> *Técnico em Soldagem, Diretor da Ogramac Metalização, São Paulo, Brasil.*

<sup>6</sup> *Doutor em Engenharia Mecânica, Prof. Dr. da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Minas Gerais, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de aspersão térmica tem sido uma dos mais eficientes recursos em custo para a proteção de substrato contra desgaste e processos corrosivos. Revestimentos à base de carbonetos e ligas inoxidáveis compõem, atualmente, uma das mais adequadas formas de proteção de produtos e sistemas contra desgaste e corrosão. Com eles, é possível enfrentar os problemas de manutenção que, no mundo, giram em torno de 4% do produto interno bruto do faturamento do setor. Para fazer frente a tais desafios, a engenharia tem utilizado várias técnicas de deposição, como a aspersão térmica e a soldagem.<sup>(1,2)</sup>

Revestimentos utilizando ligas de WC-Co, depositados pelo processo de aspersão térmica, tem sido largamente utilizados em aplicações contra o desgaste e corrosão por combinar várias vantagens como elevada dureza, resistência ao desgaste abrasivo e erosivo, além de resistência à corrosão em diversos meios. A liga WC-17Co, funciona perfeitamente bem sob condições abrasivas, no caso em que duas superfícies trabalham em movimento relativo. Quando a liga WC-17Co é utilizada como revestimento e testada, o calor resultante promove a formação de óxidos, gerando boas propriedades lubrificantes.<sup>(3,4)</sup>

Há viabilidade técnica na utilização de revestimentos dos compósitos de WC-Co depositados através do processo de aspersão térmica HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) devido às excelentes propriedades mecânicas, resistência ao desgaste e corrosão, taxa de deposição elevada e acabamento superficial superior a outros processos de deposição. Por este processo, os revestimentos apresentam porosidade extremamente baixa (tipicamente < 1%) e elevada força de adesão em relação aos processos de aspersão convencionais. Os revestimentos depositados por aspersão térmica HVOF conferem, assim, uma excelente capacidade de proteção ao substrato.<sup>(5)</sup>

Como característica, o combustível utilizado no processo HVOF é, usualmente, propano, propileno, metil-acetileno-propadieno ou hidrogênio, é misturado com oxigênio na câmara de combustão. A temperatura da chama é relativamente baixa, tornando difícil a aspersão de cerâmicas e alguns metais refratários. As altas velocidades de impacto das partículas sobre o substrato implicam que as partículas podem não necessitar estar completamente fundidas para se obter um revestimento de alta qualidade. O fato de não haver superaquecimento pode minimizar problemas de tensões residuais, o que é importante em relação a diâmetros internos e revestimentos espessos. A principal característica desse processo é a não formação de óxidos.<sup>(6,7)</sup>

O processo de aspersão a Arco Elétrico (*Arc Spray*) apresenta, normalmente, maiores taxas de deposição do que outros processos de aspersão térmica e produz um revestimento de alta aderência e alta densidade. Caracteriza-se como um processo de alta produtividade, com altas taxas de deposição, combinando com baixo custo dos consumíveis.<sup>(6,7)</sup> Os fatores que controlam a taxa de aplicação são a corrente da fonte de energia e a taxa de alimentação de arame permissível para utilizar a energia disponível. A combinação de alta temperatura e velocidade das partículas produz um revestimento de alta aderência, alta deposição e alta densidade. Este é um processo de alta produtividade, com altas taxas de deposição, combinando com baixo custo dos consumíveis.<sup>(7)</sup>

A soldagem, apesar de ser considerado classicamente como um processo de união, tem sido utilizada para a deposição de materiais sobre uma determinada superfície com a finalidade de recuperar peças desgastadas ou para formação de um

revestimento com características especiais. Tal aplicação caracteriza o processo de soldagem também como um processo de revestimento.<sup>(8)</sup> Considerando os vários tipos de materiais para revestimentos por soldagem, os aços inoxidáveis são geralmente depositados sobre superfícies de aços carbono ou aços de baixa liga, produzindo uma camada com propriedades anticorrosivas e de resistência necessárias para suportar ambientes sujeito ao desgaste e corrosão.

A soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) usa calor de um arco elétrico entre um eletrodo nu, alimentado de maneira contínua, e o metal de base. O calor funde o eletrodo e a superfície do metal de base para formar a poça da fusão.<sup>(9)</sup> As maiores vantagens do processo MIG são alta versatilidade, a larga capacidade de aplicação, a alta taxa de deposição, a baixa liberação de gás e fumaça e a ampla faixa de materiais e de espessuras que podem ser soldados. Entretanto, ocorrem descontinuidades próprias do processo, como falta de fusão, falta de penetração, inclusões de escória, trincas, poros e porosidade, sobreposição e mordedura.<sup>(10)</sup>

Utilizar materiais adequados para revestimento, que possam proteger os substratos em ambientes com alta agressividade, como materiais expostos a fenômenos de corrosão, desgaste e a temperaturas elevadas, ofereçam alta flexibilidade de adequação ao uso, além de ser economicamente viável, é, sem dúvida, uma meta ambiciosa a ser alcançada, de modo a permitir soluções nos mais diferentes campos da engenharia.<sup>(11,12)</sup>

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar e comparar as propriedades de revestimentos depositados por aspersão térmica e por soldagem sobre substrato metálico. As características mecânico- metalúrgicas e o desempenho em ensaios de corrosão e desgaste são discutidos e comparados.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material usado como substrato foi um aço carbono SAE 1020. Os materiais para aplicação no revestimento foram materiais metálicos e óxidos nano e micro estruturados. Os materiais selecionados para este trabalho foram: Vecalloy B, WC-17Co, Aço Inoxidável 420 e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr. Os processos de aplicação dos revestimentos são aspersão térmica por *Arc Spray* e por HVOF e soldagem MIG. A Tabela 1 mostra as composições químicas dos materiais utilizados e os processos de aplicação para cada material. As medidas de microdureza foram realizadas em um microdurômetro shimadzu computadorizado, com capacidade de 0,01 Kg a 2 Kg, em escala Vickers. Este trabalho dá continuidade a trabalho anterior desenvolvido no mesmo projeto.<sup>(13)</sup>

**Tabela 1.** Composição química e processo de aplicação dos revestimentos

Material	Process	% wt											
		C <sub>tot</sub>	W	Co	Cr	Nb	B	Ni	Si	Mn	Al	Fe	Others
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 25NiCr	HVOF	11.0	-	-	Bal.	-	-	19.0	-	-	0.002	-	-
SS 420	MIG welding	0.4	-	-	14.0	-	-	-	1.1 max	-	82	2.5max	
Vecalloy B	Arc-spray	-	-	-	13.2	6.0	4.2	5.5	1.2	1.3	2.0	Bal.	0,10
WC-17Co	HVOF	5.3	Bal.	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Os ensaios de corrosão foram realizados de acordo com a Norma ASTM - G48,<sup>(14)</sup> sendo realizados por imersão em cloreto férrico. A solução utilizada continha 100 g

de cloreto férrico hidratado em 900 ml de água destilada. As amostras revestidas foram preparadas previamente, sendo isoladas com material polimérico, deixando somente uma face revestida exposta. A solução utilizada permaneceu em banho-maria à temperatura de 45°C com as amostras sendo avaliadas após 24 horas e 120 horas de imersão. As amostras foram pesadas em balança de precisão antes e depois do ensaio, sendo verificada a perda de massa.

Os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados de acordo com a norma ASTM-G65-04 (areia seca/ teste roda de borracha)<sup>(15)</sup> para 2000 rotações. A carga aplicada foi de 130 N, areia de fluxo de 250 g/min e a velocidade da roda de borracha de 200 rpm.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, apresentam-se os resultados médios de micro dureza dos revestimentos obtidos. Foram executadas cinco medidas para cada amostra, sendo apresentada a dureza média.

Pela análise da Figura 1, pode-se observar que, utilizando-se o processo *arc-spray*, conseguiu-se um revestimento com maior dureza, no caso do Vecalloy B, em torno de 1.000 Hv, cerca de 40% maior que o revestimento de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr aplicado por HVOF. Entretanto, a maior dureza foi apresentada pelo revestimento de WC-17Co aplicado por HVOF que atingiu 1042 Hv. Vecalloy B tem basicamente ferro e possui uma grande porcentagem de cromo em sua composição, o que contribuiu para uma dureza elevada. WC-17Co tem basicamente tungstênio em sua composição, ou seja, tem um teor elevado de WC, o que também auxilia para uma dureza elevada. Os resultados apresentados estão de acordo com as tenacidades esperadas para tais materiais.

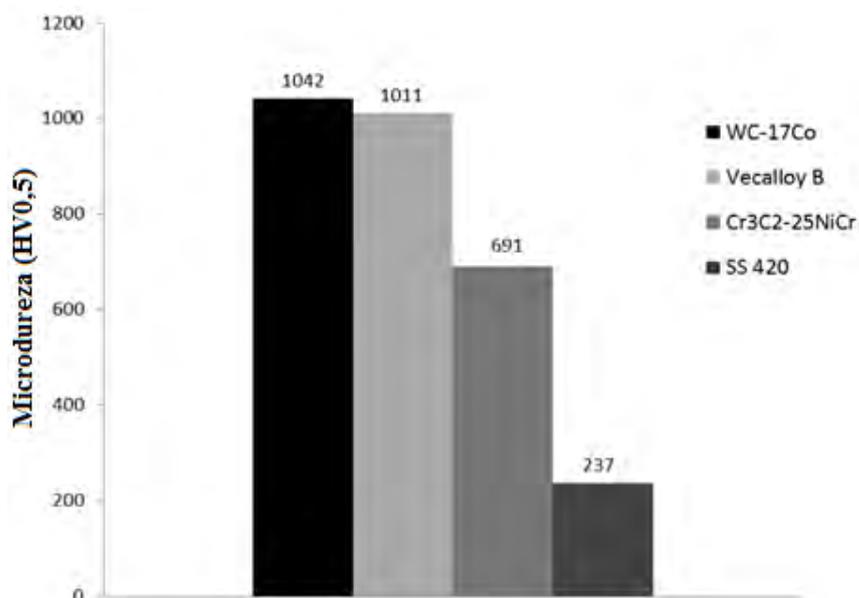


Figura 1. Resultados de microdureza Vickers dos revestimentos.

Os resultados do ensaio de corrosão realizado de acordo com a norma ASTM- G48<sup>(14)</sup> são apresentados no gráfico da Figura 2.

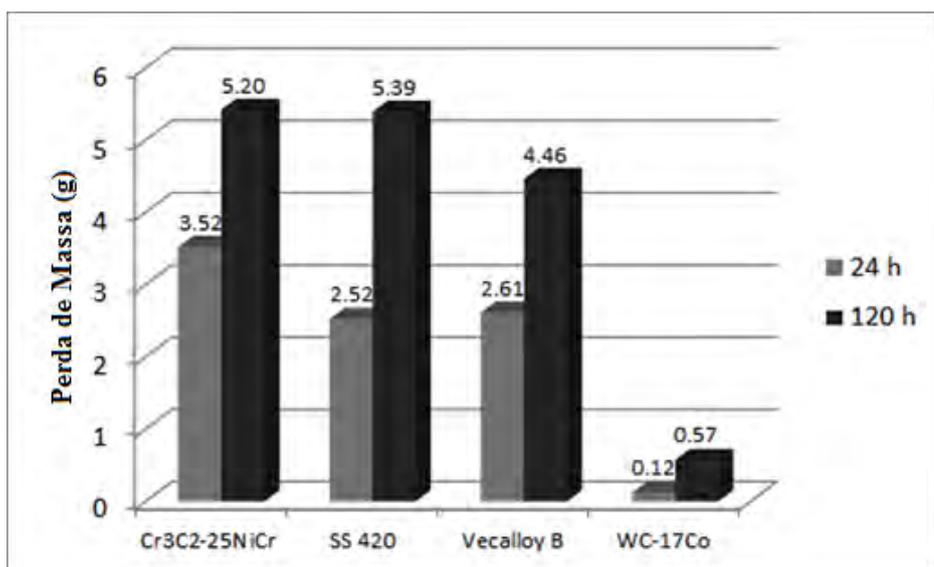


Figura 2. Resultados do ensaio de corrosão de acordo com a norma ASTM – G48.

Pela análise da Figura 2, pode-se observar um resultado bastante superior do revestimento de WC-17Co, com uma perda de massa da ordem de 20 vezes menor que o segundo material de melhor comportamento, o Vecalloy B. O pior resultado aparece com o revestimento de Aço Inoxidável 420, aplicado por soldagem, apesar de seu desempenho bastante similar ao da liga Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr. Importante notar que todos os revestimentos aplicados, exceto o WC-17Co, possuem alto teor de Cr em suas composições, com alta resistência à corrosão, especialmente o revestimento Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr, cuja base é Cr e tem alto teor de Ni. Independente disto, o resultado do revestimento à base de WC-Co foi bem superior, não só pelos materiais envolvidos, como pelo fato de apresentar muito baixa porosidade.

É importante observar que a Norma ASTM- G48<sup>(14)</sup> orienta que o ensaio seja encerrado com 72 horas. Além disso, na prática industrial, amostras são aprovadas quando resistem às primeiras 24 horas do teste, o que levaria à aceitação de todos os revestimentos aqui testados.

Os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo são apresentados na Figura 3.

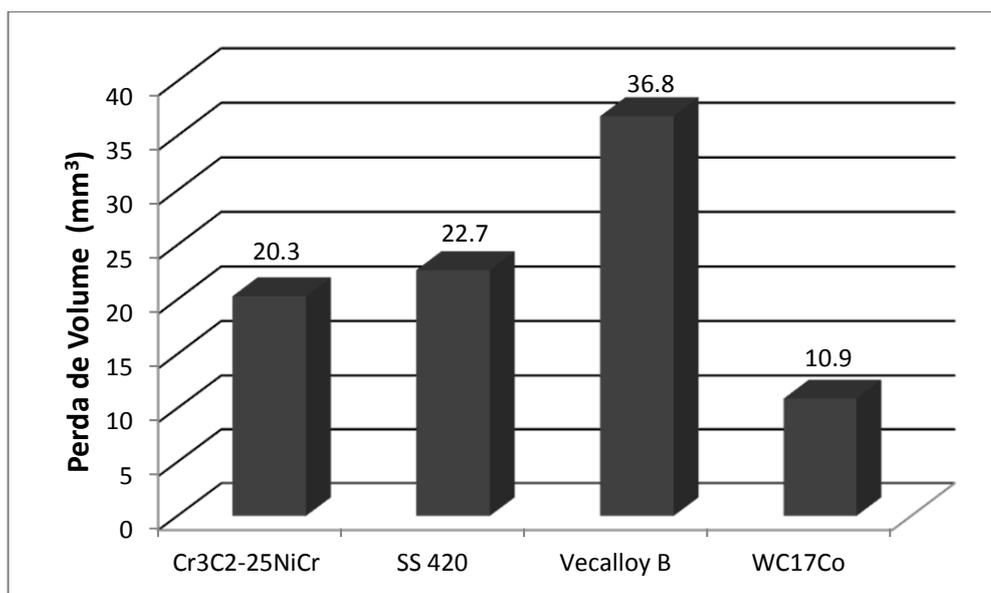


Figure 3. Resultado dos ensaios de desgaste abrasivo realizados de acordo com a ASTM –G65.

Os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo (Figura 3), mostram que o melhor resultado contra desgaste foi obtido pelo revestimento WC-17Co, com resistência quase quatro vezes superior ao Vecalloy B e duas vezes melhor que Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr ou aço inoxidável 420.

Pesquisa realizada por Aw et al.<sup>(16)</sup> concluiu por melhor resistência à corrosão para o cermet WC-Ni em comparação ao WC-Co, justificado pelo melhor comportamento à corrosão do ligante Ni. Porém, em seu experimento, este cermet apresentou também menor porosidade, o que pode justificar os resultados. Cermets são geralmente selecionados para aplicações que aproveitem sua alta resistência ao desgaste abrasivo, função de sua elevada dureza e boa tenacidade.

Quando existe a sujeição também a ataques químicos, o processo de desgaste pode ser acelerado e a corrosão do ligante tem papel fundamental. Além da corrosão localizada que o ligante pode sofrer e, por consequência, destacar partículas duras de carbonetos, existe ainda o fato de que as estruturas lamelares com eventuais poros conectados pode acelerar a degradação por permitir a penetração dos agentes corrosivos. A Figura 4 mostra imagens de MEV da seção transversal dos revestimentos de WC-17Co e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr, sendo visível a diferença do nível de porosidade entre as amostras.

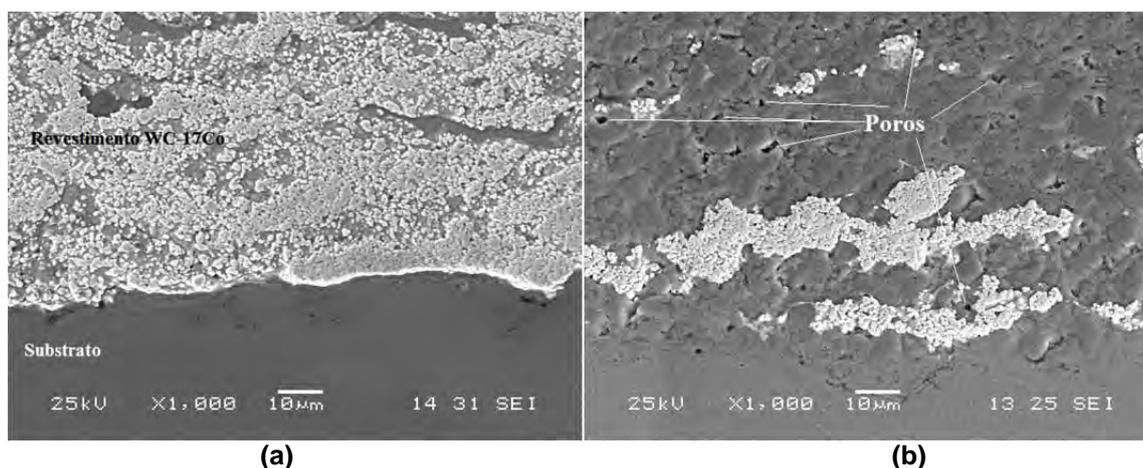


Figura 4. Imagem de MEV da seção transversal dos revestimentos de a) WC-17Co e b) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram estudados os desempenhos em desgaste e corrosão dos revestimentos Vecalloy B depositado por Arc Spray, pós de WC-17Co e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr, depositados por HVOF, e arame de aço inoxidável AISI 420, depositado pelo processo de soldagem MIG. Os resultados, em geral, mostraram que os revestimentos obtidos, pela análise por microscopia ótica e de varredura, apresentaram boa adesão ao substrato e baixo nível de defeitos.

O revestimento WC-17Co aplicado por HVOF foi o que apresentou melhor resultado geral, com menor nível de porosidade, maior microdureza superficial e melhor comportamento no ensaio de corrosão, com a menor perda de massa, cerca de 20 vezes melhor que o Vecalloy B, segundo melhor desempenho.

No ensaio de desgaste abrasivo, o revestimento WC-17Co também apresentou o melhor desempenho, mostrando-se duas vezes superior aos revestimentos de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr e AISI 420, e mais de três vezes superior ao revestimento à base de Fe-Cr.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pelo auxílio financeiro ao projeto. Especial agradecimento também à Prof. Lauralice Canale, da USP – São Carlos, pela disponibilização do equipamento para os ensaios de desgaste abrasivo.

## REFERÊNCIAS

- 1 BONACHE, V. et al. Influence of Plasma Intensity on Wear and Erosion Resistance of Conventional and Nanometric WC-Co Coatings Deposited by APS. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 20, n. 3, p. 549 – 559, 2011.
- 2 BARLETTA, M. et al. Wear and Corrosion Behavior of HVOF-Sprayed WC-CoCr Coatings on Al Alloys. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 19, n. 1-2, p. 358-367, 2010.
- 3 LI, J. et al. Mechanical and Tribological Properties of Plasma-Sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, WC-Co, and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 7, n. 2, p. 242-246, 1998
- 4 FERVEL, V.B. et al. Friction and Wear Mechanisms of Thermally Sprayed Ceramic and Cermet Coatings. *Surface and Coatings Technology*, v.111, p. 255-262, 1999.
- 5 SARTWELL, B.; LEGG, K.; Hard Chrome Alternatives Team – Tri Service Validation of HVOF Thermal Spray as a Chrome Replacement for Aircraft Landing Gear. Rowan Technology Group. Disponível em <www.hcat.org>2001, Acesso em 20 Out., 2012.
- 6 LIMA, C.R.C.; TREVISAN, R.E. *Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações*. 2a. ed., São Paulo: ArtLiber, 2007.
- 7 AWS Thermal Spraying- Practice, Theory and Applications. Miami, Flórida, American Welding Society, 1985.
- 8 JEFFUS, L. *Welding: principles and applications*. 5th ed. Austrália: Delmar Learning, 2004.
- 9 BOND, D. *Avaliação de Revestimentos Soldados Processados com Materiais Atomizados*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais Universidade Federal do Paraná, 2008.
- 10 CUNHA, L. J. G. *Solda: Como, Quando e Por quê*. Rio Grande do Sul: D.C. Luzzanatto, 1985.
- 11 GUILMANY, J. M. et al. Role of three body abrasion wear in the sliding wear behavior of WC-Co coatings obtained by thermal spraying. *Surface and Coatings Technology*, v. 140, 2001, p. 141-146
- 12 SHI, D.; LI, M.; CHRISTOFIDES, P. D. Diamond Jet Hybrid HVOF Thermal Spray: Rule-Based Modeling of Coating Microstructure. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 43, p. 3653-3665, 2004.
- 13 LIMA, C. R. C.; BETTE, B, V.; CAMARGO, F. Estudo do Desempenho em Corrosão de Revestimentos Obtidos por Aspersão Térmica e por Soldagem. In: 67<sup>o</sup> CONGRESSO INTERNACIONAL ABM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- 14 ASTM G-48-76 (Reaprovada em 2011): Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. Philadelphia, PA, USA: American Society for Testing and Materials.
- 15 ASTM G-65-04 (Reaprovada em 2010): Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. Philadelphia, PA, USA: American Society for Testing and Materials.
- 16 AW, P. K. et al. Corrosion resistance of tungsten carbide based cermet coatings deposited by High Velocity Oxy-Fuel spray process. *Thin Solid Films*, v. 516, n.16, p. 5710-5715, 2008.