

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

## **Estudo das Propriedades de Ligas Fe-Cr usadas como Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente para aplicações em meios corrosivos**

<sup>1</sup>Hector Reynaldo Meneses Costa, <sup>2</sup>Vinícius Ribeiro dos Santos de Sá Brito, <sup>3</sup>Ivan Napoleão Bastos, <sup>4</sup>Thiago Daflon dos Santos, <sup>5</sup>Yasmin Kronemberger

### **Abstract**

The protection against corrosion to steel substratum in marine environment, obtained by thermal sprayed metallic coatings, has been studied and used throughout the last years. Thus, the offshore industry comes significantly increasing the use of the thermal spray. This work has as main objective the evaluation of properties of materials formed by the sprayed of the alloy on SAE 1020 carbon steel substratum. In this study, two coatings had been evaluated, both Fe-Cr based alloys, sprayed by the electric arc process. An assessment of the microstructural morphology through the optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM) was made. The resistance to corrosion was tested in salt spray for 40 hours. The results obtained by OM and SEM indicate that both conditions had shown uniformity in the deposited layer and the presence of little oxide and porosity. The alloy that contains a significant percentage of Co had better resistance to corrosion. The Cr confers a good resistance to corrosion in alloy that contains Co, due to the formation of a protective layer of Cr oxide. The analyses showed the efficiency of alloy applications, at least for use in marine environments.

Keywords: Fe-Cr alloy, thermal spraying, salt spray

### **Resumo**

A proteção contra a corrosão de substratos de aço em ambiente marinho, obtida por meio de revestimentos metálicos aspergidos termicamente, vem sendo muito estudada e utilizada ao longo dos últimos anos. A indústria *offshore* vem aumentando significativamente o uso da aspersão térmica. Esse trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades de materiais formados pela aspersão de ligas em substrato de aço-carbono SAE 1020. Neste estudo, foram avaliados dois revestimentos, ambos a base de Fe-Cr, aspergidos pelo processo a arco elétrico. Posteriormente, foram comparados quanto à morfologia microestrutural por microscopia ótica (MO) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Já a resistência à corrosão, foi verificada pelo ensaio de névoa salina durante 40 horas. Os resultados obtidos por MO e MEV indicam que as duas condições mostraram uniformidade na camada depositada e pouca presença de óxidos e porosidades. A liga que contém um percentual significativo de Co teve melhores resultados de resistência à corrosão. Isto se deve ao fato que o Cr confere boa resistência à corrosão nas ligas que contém Co, devido à formação de uma camada protetora de óxido de Cr. Estas análises mostram a eficiência da aplicação destas ligas, pelo menos para uso em ambientes marinhos.

**Palavras-chave:** Ligas Fe-Cr, Aspersão térmica, Névoa Salina.

<sup>1</sup>D. Sc.-Professor Universitário - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow

<sup>2</sup>Engenheiro Mecânico - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow

<sup>3</sup>D Sc.-Professor Universitário - Instituto Politécnico do Rio de Janeiro

<sup>4</sup>Aluno de Engenharia - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow

<sup>5</sup>Aluna de Engenharia - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow

## **I. Introdução**

---

As necessidades tecnológicas e econômicas atuais têm contribuído para que a aspersão térmica apresente um desenvolvimento em diversos países. Isso ocorre devido a uma preocupação por parte das empresas de petróleo em ampliar a vida útil dos equipamentos expostos ao ambiente marinho severo. Deste modo, a aplicação de revestimentos por Aspersão Térmica (AT) tem o objetivo aumentar a resistência à corrosão dos materiais, peças, e componentes estruturais. O custo direto da corrosão marinha no mundo é algo em torno de 50 a 80 bilhões de dólares por ano e cerca de 40 % do valor é gasto com as aplicações de revestimentos protetores, e o custo total da corrosão corresponde a (4-5) % do produto interno bruto de diversos países [1,2].

Um método moderno e bastante eficaz para prevenção da corrosão tem sido o processo de aspersão térmica de revestimentos, geralmente metálicos. A grande variedade de materiais desenvolvidos para ser utilizado por esse processo nas mais diversas áreas de aplicação, a elevada vida útil desses depósitos aspergidos, a possibilidade de reparos imediatos em áreas danificadas e a utilização logo após sua aplicação têm contribuído para o sucesso da aspersão térmica. As técnicas de aplicações de revestimentos passam por um grande avanço tecnológico, onde importantes propriedades como porosidade e o teor de óxidos estão sendo aperfeiçoadas.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar propriedades de materiais formados pela deposição de ligas de revestimentos pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico em substrato de aço-carbono, previamente preparado com jateamento abrasivo. Algumas das propriedades que foram avaliadas são: resistência à corrosão pelo ensaio de névoa salina e as características microestruturais do material por da Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura (MO e MEV), antes e depois da exposição ao ambiente corrosivo.

## **II. Aspersão Térmica a Arco Elétrico – ASP (Arc Spray Process)**

---

Também conhecido como Arco Arame, esse é um processo avançado de deposição de ligas metálicas onde a fonte de calor utilizada é um arco elétrico obtido por diferença de potencial (entre 18 V e 40 V) no bico de uma pistola, local em que chegam dois arames que serão fundidos e depositados. Um jato de gás atomizante (em geral ar comprimido) em alta velocidade é dirigido ao arco elétrico, na região onde se funde o material, atomizando-o em forma de gotículas fundidas e projetando-o contra o substrato.

O aquecimento e a fusão ocorrem quando os arames (material aspergido) são carregados eletricamente com cargas opostas (o arame é positivo – anodo e o outro negativo - catodo). São alimentados conjuntamente e um arco é gerado quando há a interseção. Um fator limitante para esta técnica é que os materiais precisam ser eletricamente condutores [3].

A figura 1 mostra os componentes normais de um equipamento a arco elétrico e um esquema da pistola.

## **III. Metodologia**

---

Neste trabalho, foram estudadas duas combinações de revestimentos obtidos por aspersão térmica. Sendo as duas ligas compostas por Fe-Cr (B), mas uma delas com um percentual elevado de cobalto. A tabela 1 detalha as ligas intermediárias usadas e as combinações químicas das ligas formadoras do revestimento.

Os revestimentos foram aplicados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico. Inicialmente foi aplicada uma liga intermediária que aumenta a aderência do revestimento ao substrato. O níquel e o alumínio foram usados nas ligas intermediárias devido as suas altas capacidades de aderência com as ligas que compõem o revestimento, já que o aço carbono possui um baixo coeficiente de aderência com essas ligas metálicas.

### III.1. Deposição do Revestimento

Foi usado o processo de aspersão térmica a arco elétrico em um substrato de aço carbono SAE 1020 divididos em amostras em forma de tiras, de 300 mm x 25 mm x 10 mm, contendo oito pequenas amostras cada, para ensaio de dureza e microscopia. Para o estudo de corrosão (em névoa salina) foram usadas amostras de 100 mm x 150 mm x 4,5 mm.

Antes da deposição dos revestimentos metálicos, as chapas passaram por uma limpeza mecânica, grau Sa 2<sup>1/2</sup> com jateamento abrasivo com óxido de alumínio G.20. O jateamento também tem a função de possibilitar à superfície do substrato maior rugosidade (115 µm Ry-5), o que resulta em maior aderência do revestimento. Os revestimentos foram aplicados em apenas uma face de cada amostra com a espessura de 1,9 mm.

Após a deposição dos revestimentos metálicos, aplicou-se selante de resina epóxi na metade da superfície de cada chapa. O objetivo do selante é diminuir a porosidade do revestimento conferindo à superfície maior resistência à corrosão.

### III.2. Microscopia Ótica

Com as amostras já revestidas elas foram cortadas na máquina de corte e em seguida embutidas com resina de baquelite (polímero na forma de pó). Foi usada uma prensa de embutimento AROTEC (PRE-30).

Após o embutimento, as amostras foram lixadas com a seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400, 600, diamante de 6 µm, 3 µm e 1 µm. Assim após o embutimento das amostras com baquelite de cada tipo de revestimento, foram observados os revestimentos com microscópio óptico OLYMPUS BX60MF.

Para análise de porosidade dos revestimentos, as amostras prontas foram examinadas no microscópio ótico acoplado a uma câmera onde pôde ser obtida a imagem em uma escala maior. Com o uso do programa IMAGE-PRO foi possível capturar as imagens e quantificar o percentual de área porosa.

### III.3. Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise microestrutural das amostras foi feita no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo 688A-1SS – JEOL (5800LV) da marca NORAN Instruments e a análise da composição química dos elementos via análise EDS (electron diffraction scanning). Este tipo de análise, por ser semiquantitativa, apresenta um erro que pode variar entre 4 % a 5%, dependendo da quantidade de elementos presentes e da porcentagem dos mesmos.

Essa primeira análise no MEV tem como objetivo observar as diferentes características microscópicas de cada material, podendo assim observar porosidades e defeitos decorrentes do processo de metalização. O recurso de EDS é utilizado para obter os

espectros para verificação dos elementos de liga presentes, bem como para caracterização microscópica geral do material. Este dispositivo permite ainda identificar e mapear a distribuição dos elementos químicos.

#### III.4. Ensaio de Névoa Salina

O ensaio de corrosão por névoa salina foi feito em três chapas de cada combinação e os procedimentos para o ensaio foram padronizados conforme a norma ASTM B 117. As amostras foram expostas por 40 horas em uma câmara de névoa salina, Equilam, modelo SS 600e.

As câmaras foram desenvolvidas exclusivamente para ensaios de camada de proteção em corpos-de-prova passíveis de corrosão. Segundo a Norma ASTM B 117, a temperatura do ambiente de instalação e uso do equipamento deverá estar entre 18 °C a 28 °C. Já a temperatura da câmara deve ser ajustada para 35 °C e do saturador para 47 °C. A solução deve ser de 5 % de NaCl (1000 g de NaCl a cada 20 L de água) em água destilada.

Para cada revestimento foram utilizadas três amostras, obtendo-se uma média de corrosão dos revestimentos. As amostras foram fixadas com um ângulo de 15° a 30° com a horizontal, evitando assim um acúmulo de água na superfície da chapa.

#### III.5. Ensaio de Microdureza Vickers

A microdureza Vickers das amostras foi determinada. Foram aplicadas 10 cargas de 500 g no revestimento das amostras com baquelite. A marca do durômetro é Wilson Instruments e o modelo 422MVD. Foi feita uma análise do perfil ao longo do substrato, da liga de aderência e do revestimento. Além do estudo de regiões sem porosidades, regiões com defeitos e outra feita aleatoriamente.

### IV. Resultados e Discussões

---

#### IV.1. Microscopia Ótica

As figuras 2 e 3 mostram as micrografias obtidas no microscópio ótico. A parte superior do revestimento (clara) é o substrato do material e a parte mais inferior do revestimento (escura) é o baquelite utilizado no embutimento. Pelas micrografias podem ser observados também os elementos autoligantes (liga intermediária). No caso de estudo de revestimento não é utilizado ataque químico.

A tabela 2 mostra o percentual de porosidade encontrado nas amostras pelo programa Image-Pro, obtidas por microscopia ótica. Na figura 4, observa-se uma imagem do método utilizado para avaliar a porosidade e também de algumas ferramentas utilizadas no programa Image-Pro.

Por meio da análise feita no microscópio ótico, pode-se observar uma uniformidade em todo o revestimento das duas ligas metálicas. Devido ao adequado procedimento de deposição das camadas metálicas, a ocorrência de porosidade foi muito baixa, chegando a 3,9 % no revestimento de Fe-Cr e 2,7 % no revestimento de Fe-Cr-Co.

#### IV.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

Nas figuras 5 a 9 são apresentadas as micrografias de cada revestimento obtidas no MEV e espectros das análises realizadas em cada revestimento.

Na figura 5 são mostrados detalhes da condição 1, com análises feitas nas áreas 1 (defeito de solidificação) e 2 (estrutura lamelar). As figuras 6 e 7 mostram os espectros de EDS obtidos.

Na figura 8, são mostrados detalhes da condição 2, com análises feitas nas áreas 1 e 2 (estrutura lamelar). Nas figuras 9 e 10 os espectros resultantes da análise na amostra do revestimento (Ni – Al) - Fe – Cr (B) / Co – Cr (W) são apresentados.

Além da observação visual no microscópio eletrônico de varredura, foi possível obter espectros (EDS) que identificaram presença de ferro e cromo em quantidades bem superiores a dos outros elementos químicos no revestimento 1. Já no revestimento 2, conforme mostram as figuras 8 e 9, é possível observar uma presença significativa de cobalto.

#### IV.3. Névoa Salina

Com o término do ensaio, inicialmente desligou-se a máquina e então após 30 minutos a tampa da câmara foi aberta para retirada dos corpos-de-prova. A figura 11 apresenta a câmara de névoa salina antes da retirada das amostras.

Para quantificação das áreas corroídas utilizou-se uma grade com quadrados de 10 mm x 10 mm. Assim, foi definida uma área da parte corroída que seria avaliada, sendo seis quadrados de 10 mm na horizontal e oito quadrados de 10 mm na vertical, totalizando 4800 mm<sup>2</sup> (60 mm x 80 mm). Assim, os resultados quantitativos de corrosão nas chapas são calculados para a proporção da área corroída e da área total.

Já no método de pontos, cada amostra foi dividida em 63 pontos, utilizando a mesma grade quadriculada. Então, foram observados os pontos de oxidação na amostra e em seguida comparados com os pontos da grade, achando uma quantidade percentual de corrosão. É importante ressaltar que, em todas as amostras, as partes seladas permaneceram praticamente intactas, sem nenhum sinal de corrosão.

Após o ensaio de névoa salina, observou-se um processo corrosivo mais intenso em um dos revestimentos. Sendo o revestimento 2, o que obteve melhor resistência à corrosão, comparado com o revestimento 1, conforme observado na tabela 3.

Verificou-se um baixo percentual de corrosão das amostras com presença de cobalto (revestimento 2) comparado com as amostras sem a presença deste elemento químico (revestimento 1).

Nos espectros (EDS) correspondentes aos revestimentos, identificou-se a presença importante de cobalto no revestimento 2. Fato este, que possibilita ao cromo conferir uma boa resistência à corrosão, devido à formação de uma camada protetora de óxido de Cr nas ligas que contém Co [5,6].

#### III.4. Ensaio de microdureza Vickers

Foram realizadas dez medições para cada amostra ao longo do revestimento, começando pela mais próxima à superfície e terminando na interface (medição 10). Na figura 12 é apresentado o perfil de microdureza dos revestimentos ao longo da espessura.

Foi possível identificar uma grande diferença entre o valor médio da dureza do substrato (132,8 HV) e o valor do perfil de dureza dos revestimentos observados na figura anterior. No ensaio de microdureza Vickers ao longo do perfil do revestimento, observou-se uma diferença entre valores médios de microdureza das duas amostras comparadas. Conforme pode ser observado a seguir, o valor médio de dureza para o revestimento de composição Fe – Cr (B) / Co – Cr (W) (Revestimento 1) foi superior ao revestimento de composição Fe – Cr (B) / Fe – Cr (Ni) (Revestimento 2).

Fe – Cr (B) / Co – Cr (W) (Revestimento 1): 427,2 HV

Fe – Cr (B) / Fe – Cr (Ni) (Revestimento 2): 453,5 HV

## Conclusões

Foi observado que devido ao processo de aspersão térmica a arco elétrico a camada de revestimento apresentou-se uniforme, com ótimo percentual de porosidade nos dois revestimentos estudados.

Nos espectros (EDS) correspondentes aos revestimentos, identificou-se a presença significativa de cobalto no revestimento de composição Fe – Cr (B) / Co – Cr (W). Fato este, que possibilita ao cromo elevar a resistência à corrosão, devido à formação de uma camada protetora de óxido nas ligas com cobalto.

Porém o baixo percentual de corrosão do revestimento Fe – Cr (B) / Co – Cr (W), comparado ao revestimento de composição Fe – Cr (B) / Fe – Cr (Ni), foi possível também devido ao baixo percentual de porosidade encontrada nestas amostras. Mostrando assim a correlação entre a corrosão com o percentual de porosidade.

Verificou-se ainda que o revestimento Fe – Cr (B) / Co – Cr (W) resultou em uma dureza mais elevada, indicando que a dureza também está associada ao menor índice de porosidade.

Concluindo, pode-se afirmar que a deposição por aspersão térmica a arco elétrico de ligas metálicas constitui-se em uma maneira bastante promissora de produção de superfícies resistentes à corrosão.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ, CAPES e CNPq pelo apoio a este projeto.

## Referências bibliográficas

[1] EMINOGLU, C. M., KNIGHT, R., DEFALCO, J. & DORFMAN, M. “Potentiodynamic Corrosion Testing of HVOF Sprayed Stainless Steel Alloy”. Proceed. of the United Thermal Spray Conference, Düsseldorf, Germany, 39-44, 17-19 March 1999.

[2] TOTLANI, M. K., GROVER, A. K., ATHAVALE, S. N. & PAPACHAN, A. L. “Corrosion Protection by Metallic Coatings”. Transactions of the Metal Finishers’ Association of India, Vol. 9, No 4, 227-237, Dec. 2000.

[3] LIMA, C.C., TREVISAN, R., Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações, Artliber Editora, São Paulo, Brasil, 2007.

[4] TERRES, C. J. F., “Avaliação de revestimentos de aços inoxidáveis depositados por aspersão térmica” Dissertação de Mestrado, UFP, Curitiba, 2006.

[5] GENTIL, V., Corrosão, LTC Editora, Rio de Janeiro, Brasil.

[6] NUNES, L. P., Fundamentos de resistência à corrosão, Editora Interciência Ltda., Rio de Janeiro, Brasil.

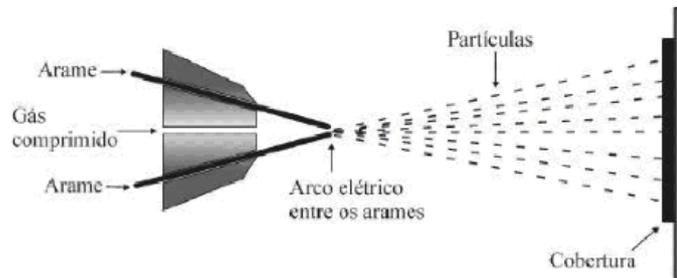
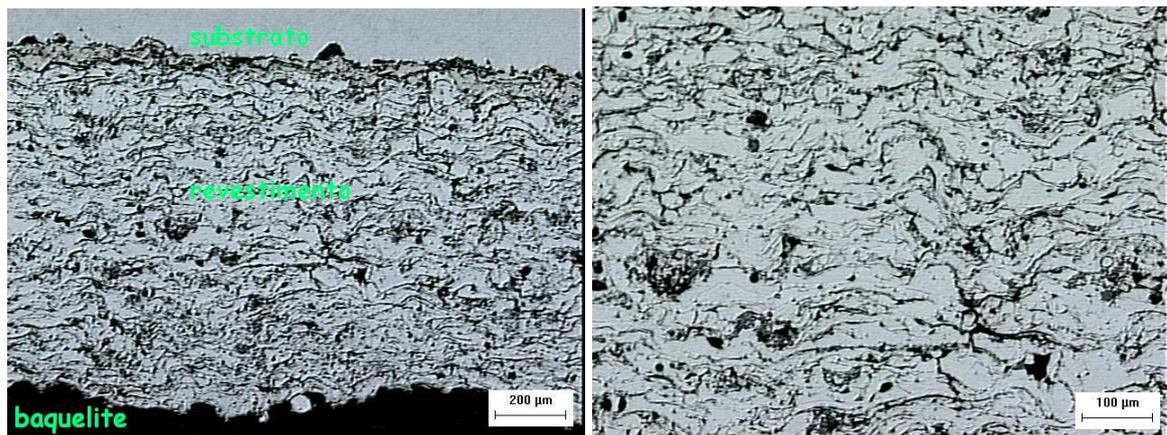


Figura 1- Esquema de um equipamento a arco elétrico e de sua pistola [4].

Tabela 1- Combinações químicas dos revestimentos aspergidos termicamente.

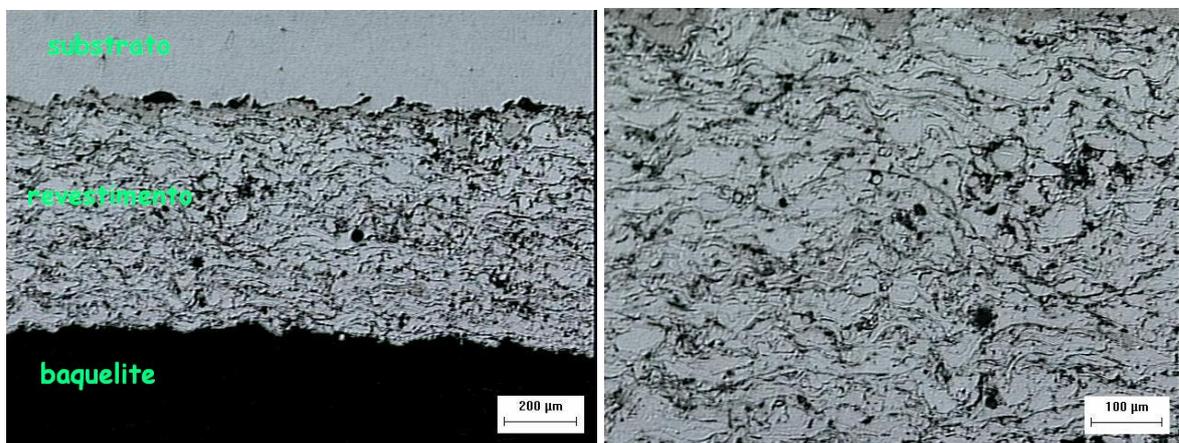
	<b>Ligas Intermediárias</b>	<b>Revestimentos</b>
1	Ni – Al	Fe – Cr (B) / Fe – Cr (Ni)
2	Ni – Al	Fe – Cr (B) / Co – Cr (W)



(a) Aumento de 50x

(b) Aumento de 100x

Figura 2 - Revestimento de (Ni - Al) - Fe - Cr (B) / Fe - Cr (Ni)



(a) Aumento de 50x

(b) Aumento de 100x

Figura 3 - Revestimento de (Ni - Al) - Fe - Cr (B) / Co - Cr (W)

Tabela 2 - Percentual de porosidade em cada condição

REVESTIMENTOS	ÁREA COM POROSIDADE
(Ni - Al) - Fe - Cr (B) / Fe - Cr (Ni)	3,9 %
(Ni - Al) - Fe - Cr (B) / Co - Cr (W)	2,7 %

Tabela 3 - Resumo da fração superficial corroída.

Medição por Área	Revestimento1	Revestimento 2
Amostra 1	40 %	12 %
Amostra 2	46 %	10 %
Amostra 3	64 %	6 %
<b>Média</b>	<b>50 %</b>	<b>9 %</b>
Medição por Pontos	Revestimento1	Revestimento 2
Amostra 1	36 %	36 %
Amostra 2	54 %	34 %
Amostra 3	78 %	32 %
<b>Média</b>	<b>56 %</b>	<b>34 %</b>
<b>Média Geral</b>	<b>53 %</b>	<b>21 %</b>

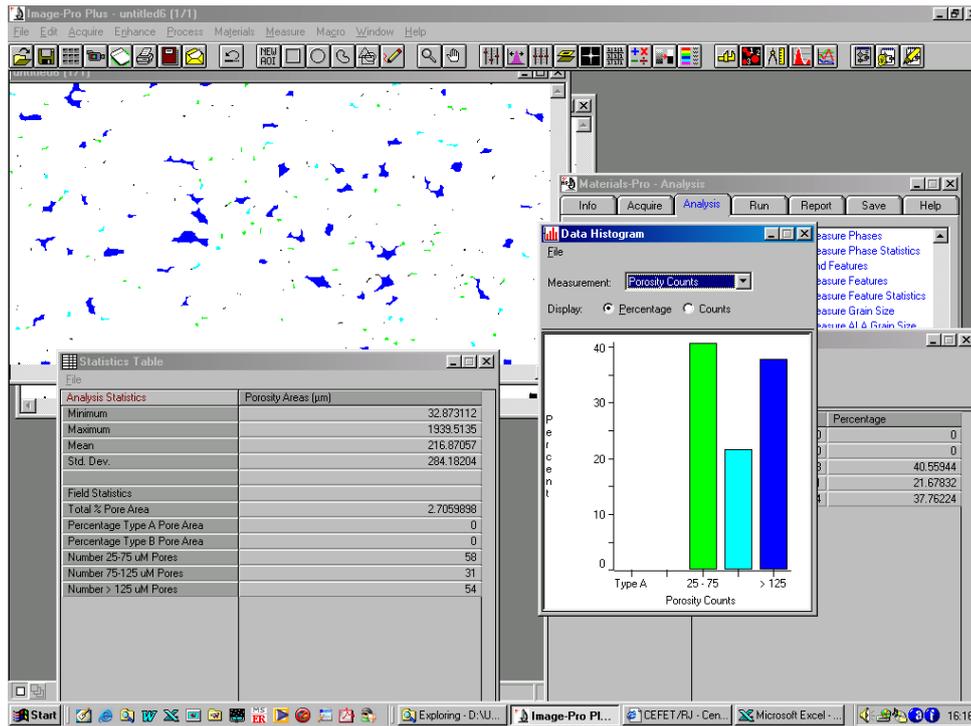
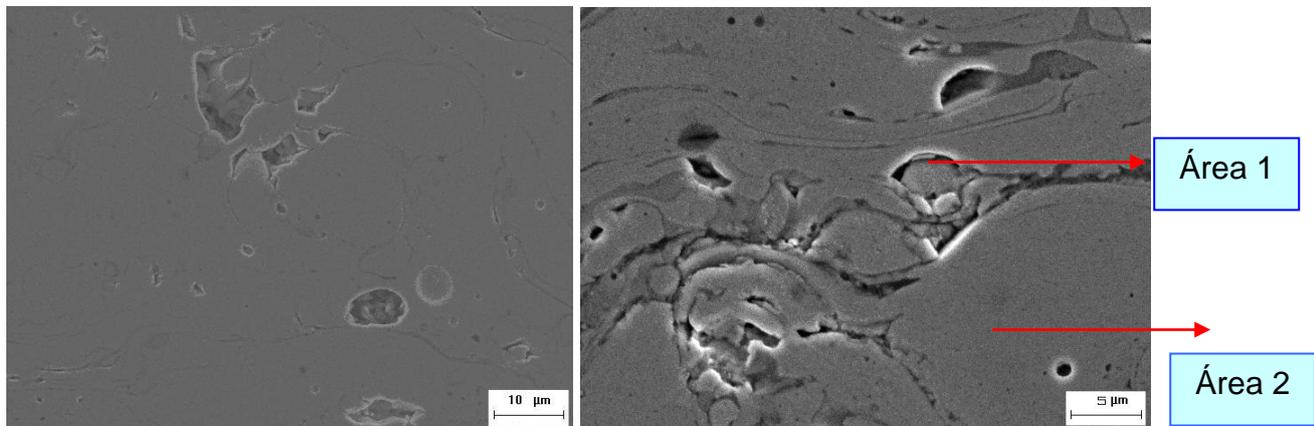


Figura 4 - Imagem das ferramentas do programa utilizado para avaliação de porosidade.



(a) Aumento 1000X

(b) Aumento 2000X

Figura 5 - Revestimento: (Ni – Al) - Fe – Cr (B) / Fe – Cr (Ni)

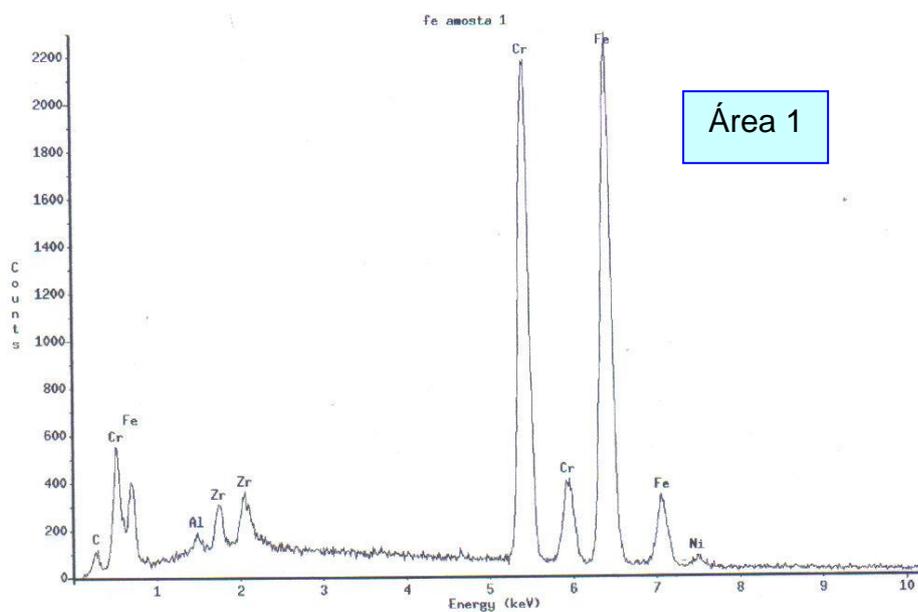


Figura 6 - Espectro de EDS na área 1, conforme figura 5.

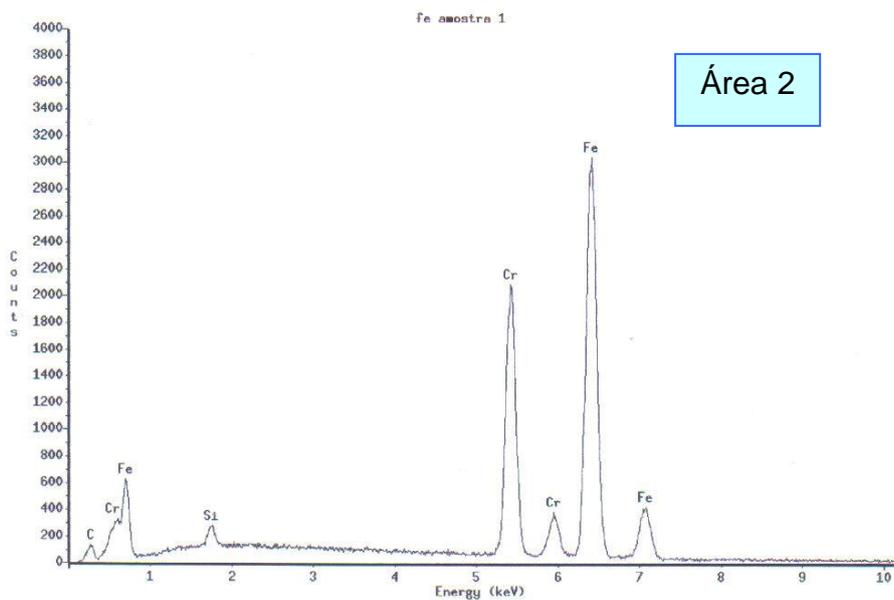
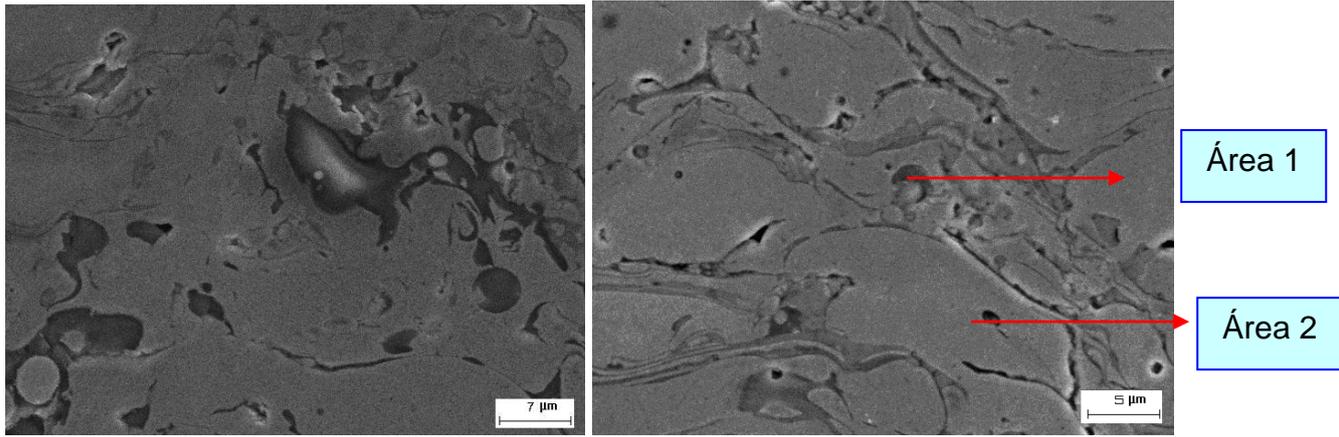


Figura 7 - Espectro dos EDS na área 2, conforme figura 5.



(a) Aumento 1500X (b) Aumento 2000X  
 Figura 8: Revestimento: (Ni – Al) - Fe – Cr (B) / Co – Cr (W)

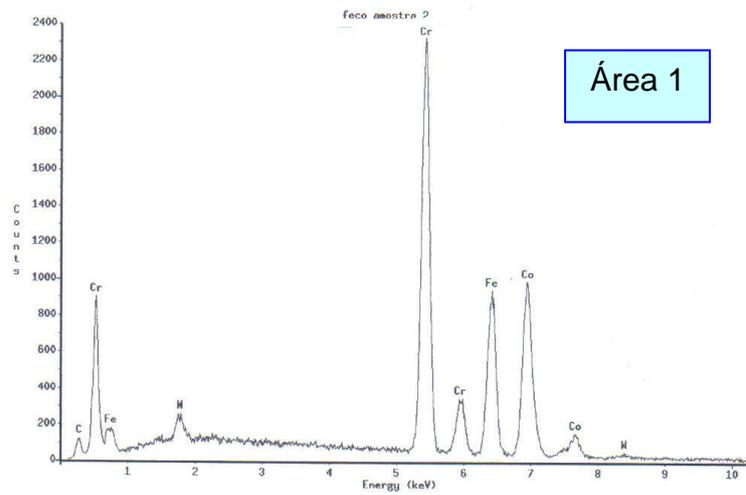


Figura 9 - Espectro dos Elementos Químicos na área 1, conforme figura 8.

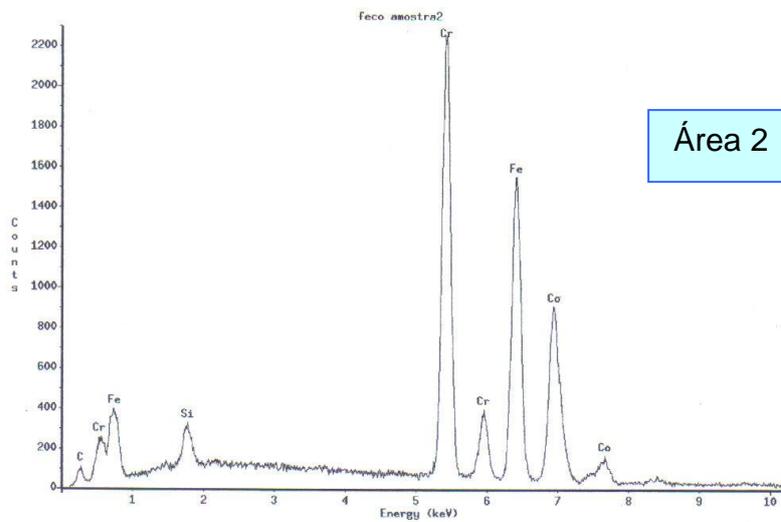


Figura 10 - Espectro dos Elementos Químicos na área 2, conforme figura 9.



Figura 11- Amostras fixadas em ângulo de 15° a 30° com a horizontal após o ensaio de névoa salina.

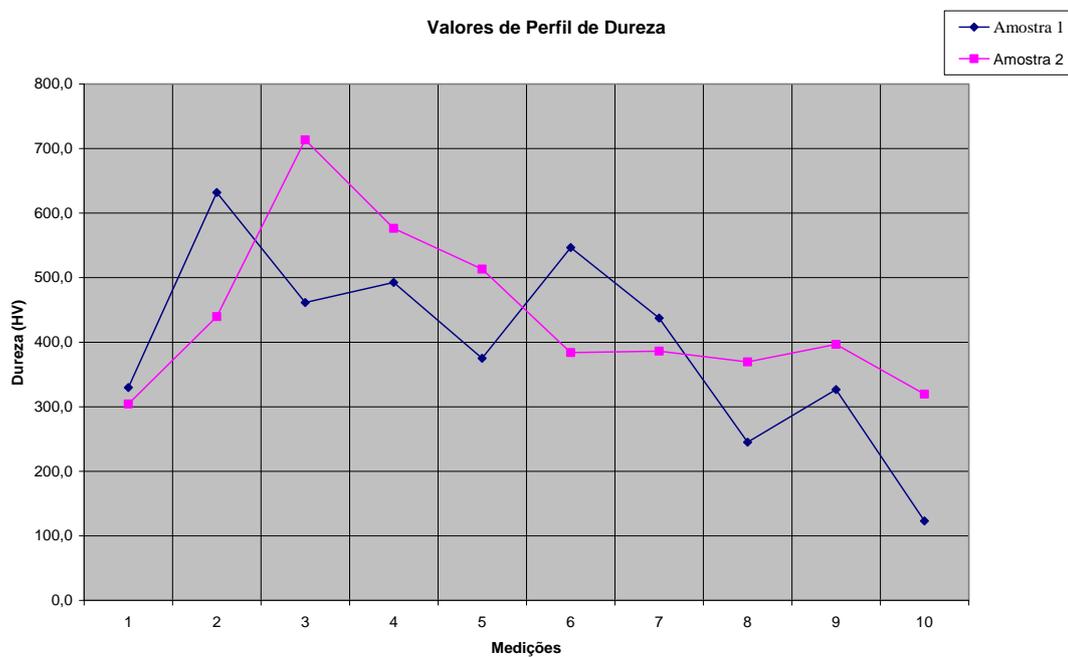


Figura 12 - Perfil de Dureza (HV 500) para cada revestimento.