



Técnicas de Medição de Propriedades de Revestimentos.

1. Medição da espessura e rugosidade do substrato e superfície da camada de Al.

Seguindo a literatura e normas existentes, utilizou-se para os ensaios de corrosão, como névoa salina e eletroquímicos, camadas de Al com espessuras nominais de $\sim 250\mu\text{m}$, valor amplamente citado como suficiente para evitar a porosidade passante. Na avaliação da aderência por tração, $380\mu\text{m}$ foi a espessura adotada, enquanto para os ensaios de dobramento as espessuras foram de 175 a $250\mu\text{m}$, conforme recomendações da marinha americana [1].

Para medições de espessura em laboratório o método mais utilizado é o metalográfico, através de um corte transversal da camada, pois garante boa precisão e é possível sua utilização em qualquer tipo de material revestido. No caso de camadas não magnéticas, como é o caso do alumínio, depositadas sobre substratos magnéticos (aços ferríticos ou martensíticos) as medições são facilitadas por equipamentos que se baseiam no princípio da indutância magnética [2]. No presente caso foi utilizado equipamento da marca Mitutoyo modelo 179-701, específico para medição de camadas não-magnéticas sobre substratos magnéticos.

Como na prática a espessura de um revestimento depende tanto das variáveis inerentes ao equipamento de aspersão como do operador, é necessário que se façam várias medições. Verificou-se que é possível detectar desvios entre as medições, porém sempre dentro de limites aceitáveis de espessura. Para a verificação da espessura média das camadas foram efetuadas cinco medições em diferentes posições dentro da superfície do tarugo de $\varnothing 25.4$ mm.

Para a medição da rugosidade da superfície a ser aluminizada e da superfície da camada de Al foram utilizados os tarugos para avaliação da tensão de aderência por tração e os cps para o

ensaio de névoa salina. As medições (5) do substrato de aço foram efetuadas através de rugosímetro portátil, com apalpador de contato mecânico, marca Mitutoyo, modelo Sufstest 211 com capacidade de medição 0,3 a 160 μ m para Ry. Para as medições Ry (5 medições) da superfície de Al com registro gráfico do perfil de rugosidade, foi utilizado equipamento de bancada marca Perthen, modelo S8P, com apalpador mecânico RHT 650 tipo estilete mecânico sem patim FRW 750. Percurso de apalpamento 5,6 mm, cut-off 0,8 mm e filtro gaussiano.

2. Medição da aderência

A resistência mecânica de um revestimento efetuado por AT depende da aderência entre a camada e o substrato, bem como da coesão entre as partículas depositadas. Como pode-se verificar pela literatura [3] e pela recente revisão do TWI [4] existem numerosos e diversificados testes para determinação da aderência de camadas depositadas por AT, devido a grande importância desta propriedade na qualificação das camadas. Nesta pesquisa foram aplicados os ensaios padronizados de tração e de dobramento, respectivamente para determinar quantitativa e qualitativamente a aderência das camadas.

Aderência pelo ensaio de tração.

Para a análise quantitativa é utilizado o teste proposto pela norma ASTM C-633/79 [5] para verificação da aderência por tração em laboratório. Em campo são definidos testes utilizando o princípio da tração por meio de equipamentos portáteis conforme norma ASTM D-4541 [6, 7]. Os equipamentos portáteis existentes diferem pelo tipo de aplicação de carga de tração, que pode ser mecanicamente ou através de fluídos hidráulicos ou pneumáticos.

Para a avaliação os requisitos mínimos de aderência serão os recomendados pela norma ANSI/AWS C2.18-93, a que considera uma média de 13.8 MPa na medição de cinco cps sem ter nenhum valor abaixo de 10.3 MPa. O método de laboratório para o arrancamento de revestimento consiste em aplicar uma camada de Al na superfície plana de tarugo de \varnothing 25,4mm, na qual é colada com adesivo um “corpo de extração” que após a cura é tracionado por uma máquina de

tração, segundo o esquema da figura 1. A camada a ser ensaiada deve ter espessura acima de 380 μm até um máximo de 500 μm de modo a evitar a penetração do adesivo ao substrato.

Os tipos de ruptura que podem ocorrer após o ensaio de tração são os seguintes:

- ruptura na camada (falha por coesão);
- ruptura na interface revestimento/substrato (falha de aderência);
- ruptura combinada : no adesivo - por coesão - por aderência;
- ruptura no adesivo.

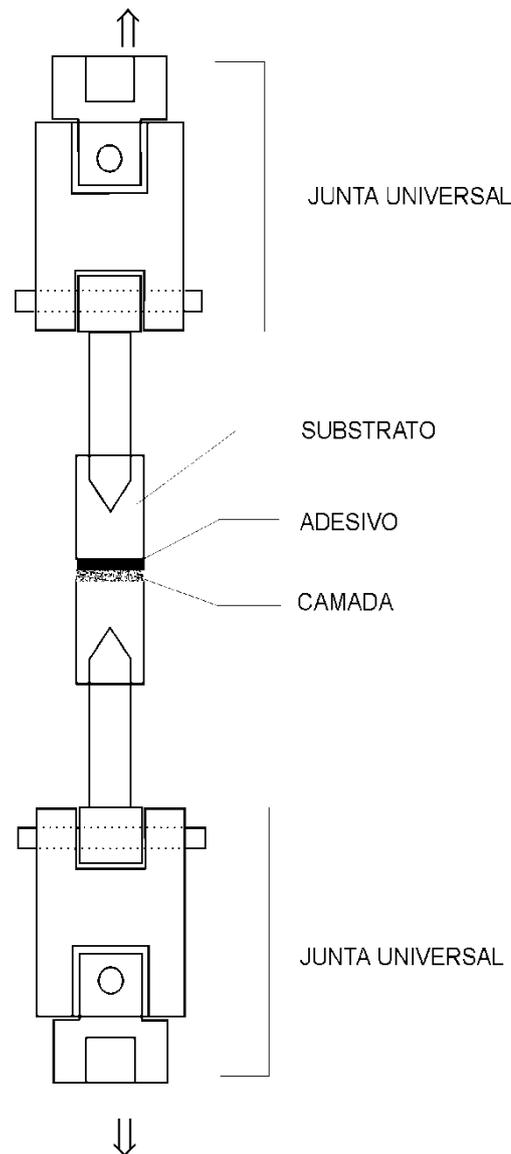


Figura 1. Esquema do procedimento para a medição da tensão de aderência [5].

Para os ensaios de tração foi usado o adesivo da 3M CA-9, que não permitiu medir a aderência real das camadas depositadas pelos processos ASP e HVOF. Mais recentemente, já na fase final dos ensaios, teve-se acesso ao adesivo Araldit AW106 com endurecedor HV 953U que

mostrou melhor qualidade. Destaca-se que houve grande dificuldade em se encontrar e adquirir no mercado nacional adesivos cura a frio de alta resistência.

Aderência pelo ensaio de dobramento.

O ensaio de dobramento fornece um comparativo da ductilidade da camada indicando sua maior ou menor aderência ao substrato. A metodologia do ensaio segue estritamente o recomendado pela norma MIL 2138 A [1] e Petrobrás N-2568 [8].

Os parâmetros para o ensaio de dobramento utilizando estas normas são descritas na tabela 1 e os critérios de avaliação constam da tabela 2, e na figura observa-se a aparência da superfície após ensaio de dobramento.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nos ensaios de dobramento

Dimensões dos corpos de prova	1,25x50x75mm
Velocidade de avanço do cutelo	1,25x10 ⁻³ m/s (medição aparelho portátil)
Diâmetro do cutelo	13mm
Diâmetro dos apoios	32mm
Distâncias entre apoios	22mm
Ângulo de dobramento	180°
Espessura da camada depositada	entre 175 e 250µm

Tabela 2. Critério de avaliação dos ensaios de dobramento para aprovação das camadas

Condição	Aparência da superfície
Ideal	Sem micro trincas, ou micro trincas superfícies
Marginal	Contém micro trincas, sem desgarramento ou delaminação da camada.
Rejeitada	Contém trincas e fendas com desgarramento e delaminação da camada.

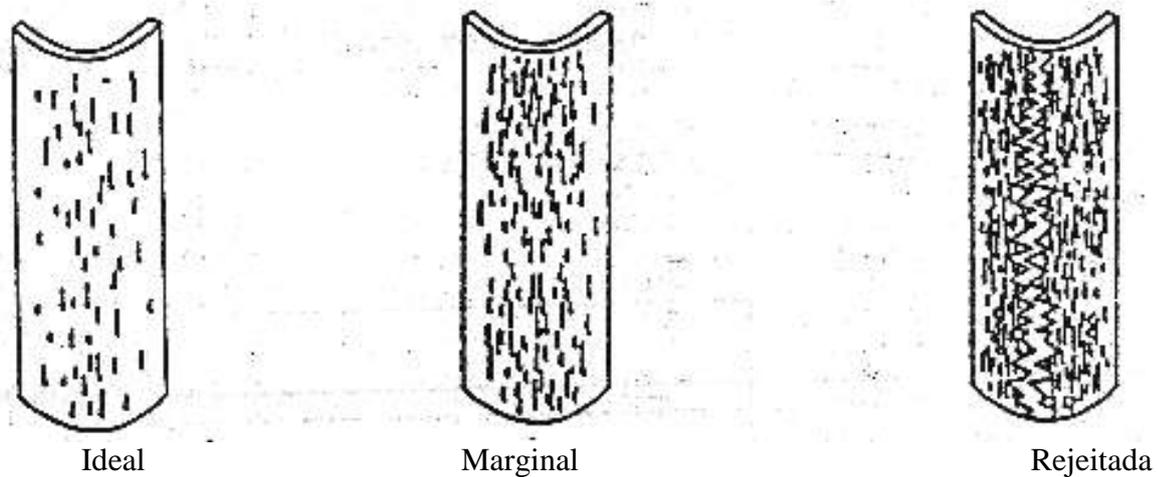


Figura 2. Aparição da superfície dos corpos de prova após ensaio de dobramento.

Na figura 3 observa-se equipamento de medição da aderência por dobramento seguindo os requisitos estabelecidos pela Norma MIL 2138 A [1]. A figura 4 mostra corpos de prova após ensaio de dobramento em revestimento de alumínio.



Figura 3. Equipamento de medição da aderência por dobramento, segundo norma MIL 2138 A [18].

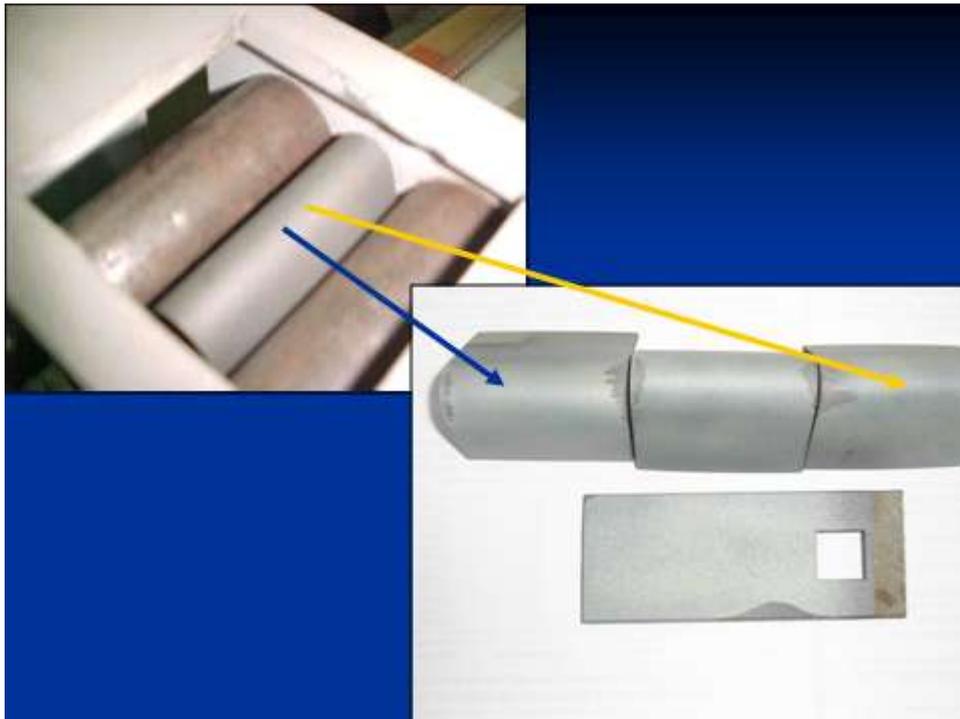


Figura 4. Corpos de prova revestidos com alumínio após ensaio de dobramento.

Nas figuras 5, 6 e 7 observa-se corte transversal do revestimento depositado em aço ao carbono após ensaio de dobramento.

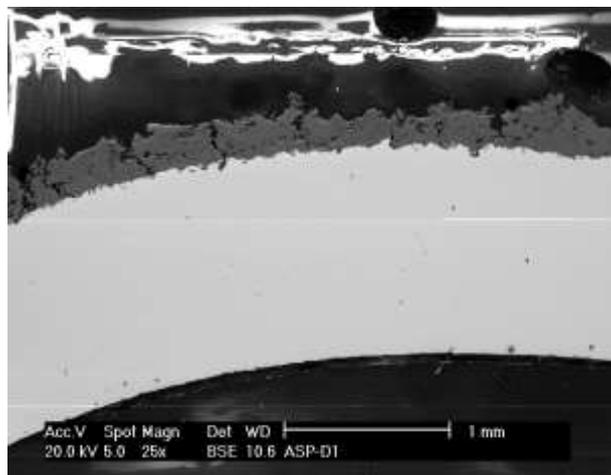


Figura 5. Microestrutura das camadas (seção transversal) de Al depositadas por ASP após ensaio de dobramento, 100x.

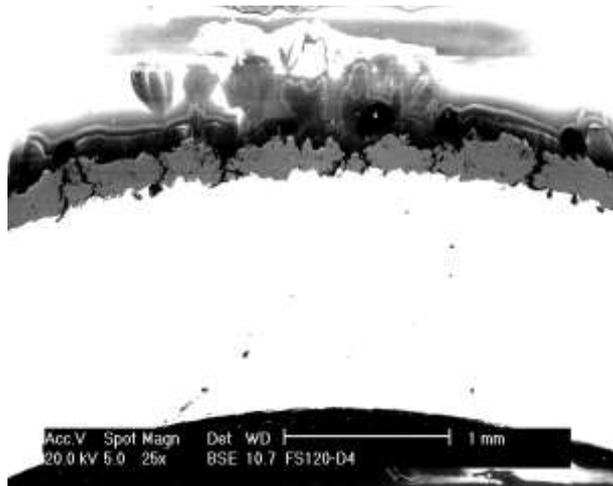


Figura 6. Microestrutura das camadas (seção transversal) de Al depositadas pelo processo FS após ensaio de dobramento, 100x.

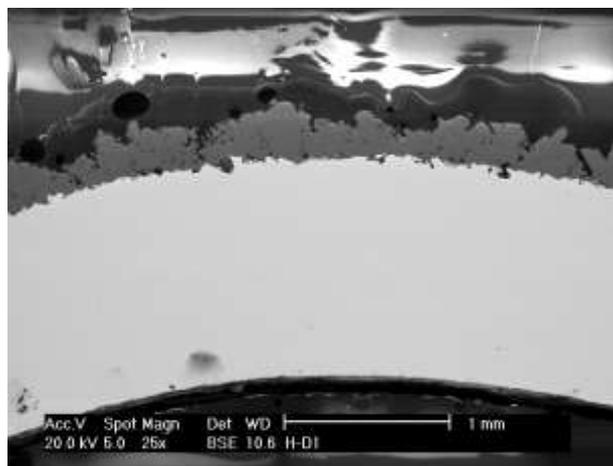


Figura 7. Microestrutura das camadas (seção transversal) de Al depositadas pelo processo HVOF após ensaio de dobramento, 100x.

4.4.3. Medição da porosidade

Para confirmação da ausência de porosidade passante em revestimentos com espessura de alumínio de $\sim 250 \mu\text{m}$ foi empregado o teste do ferrocianeto de potássio. O procedimento considera a utilização de uma solução que contém entre 1 a 2 % de NaCl e entre 0.1 a 0.5 % de ferrocianeto de potássio. A solução é colocada em gotículas sobre a superfície revestida e através de observação visual verifica-se, instantaneamente, de acordo com informação da METCO [9] a presença de uma reação de cor azul se a porosidade é passante.

Para a avaliação da porosidade na camada foi utilizada a técnica de análise de imagens de acordo a publicações especializada em AT [10,11].

A quantificação da porosidade da camada de Al foi feita em cps observados e fotografados no microscópio electrónico de varredura MEV, auxiliado por analisador de imagens modelo analySIS 2.0 marca Users Guide. O equipamento permite quantificar os seguintes parâmetros: área da camada, fração de área (poros), área média dos poros e número de poros.

Para a requerida quantificação torna-se necessário discretizar as micrografias, o que é realizado em microcomputador onde as imagens são digitalizadas, fornecendo um arquivo manipulável, que é posteriormente binarizado [12-13].

A binarização define uma função de base matriz sólida-espaço poroso permitindo a quantificação dos parâmetros. A técnica permite medir poros com área a partir de $5 \mu\text{m}^2$ e desprezar eventuais defeitos não inerentes ao processo de aspersão térmica, mas introduzidos por abrasão na etapa de preparo metalográfico.

Referências Bibliográficas.

- [1] MILITARY STANDARD 2138-A. Metal sprayed Coatings for Corrosion Protection Aboard Naval Ships (METRIC), 36p. 1992.
- [2] O 2178 INTERNATIONAL STANDARD: Non-magnetic coatings on magnetic substrates. Secon edition, 6p. 1982.
- [3] MILEWISK, W. Current analysis of hitherto adhesion test methods for thermal sprayed coatings (in germany). DVS 152. p. 258-260. Aachen 1993.
- [4] BLUNT, F.J. A Review of Techniques for Measuring and ranking Adhesion of HVOF Sprayed coatings. Report TWI, 25p.. April 1996.
- [5] NORMA ASTM C 633. Standard Test Method for Adhesion or Cohesive Strenght of Flame-Sprayed Coatings, p. 754-760. 1979.
- [6] AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D 4541: standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers, 5p. Philadelphia 1986.

- [7] THOMASON, W.H., IVIE, R.G. Experiences with a hydraulic Adhesion tester for Quality control of Thermal Sprayed Aluminum coatings for long term Submerged Service in the Ocean. Proceedings of the 3rd National Thermal Spray Conference, Long Beach- USA/ p. 285-290. May 20-25, 1990.
- [8] CONTEC - Comissão de Normas Técnica- Petrobrás. N- 2568. Seleção e Aplicação (por aspersão térmica) do Alumínio, Zinco e suas ligas, 34p. Jan 1995.
- [9] REPORT METCO #106. EVALUATION METHODS AND EQUIPMENT FOR FLAME SPRAYED COATINGS. Research laboratory, item 12, 15p. 1973.
- [10] BLUNI, S.T. and MARDER, A.R. The Use of Quantitative Image Analysis for the Characterization of a Thermal Spray Coating. Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference, p. 89-96. Pittsburgh, PA, USA. May 1991.
- [11] FOWLER, D.B. et al. Image Analysis Applied to Thermal Sprayed Coatings. Thermal spray research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference, p. 303-319. Long Beach, CA. USA/May 1990.
- [12] FERNANDES, C.P. Caracterização morfotopológica de espaços porosos: Reconstituição Multiescala e Simulação de Processos de Invasão de Fluidos Não-Molhantes. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica,. Universidade federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, cap. 2 p. 23-24. Junho 1994.
- [13] BLUNI, S.T. and MARDER A.R. The use of Quantitative Image Analysis for the Characterization of a thermal Spray Coating. Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference, p. 89-95. Pittsburgh, PA. USA May 1991.

Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Engº.

**Coordenador do Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais - LABATS
Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC - Universidade Federal do Paraná - UFPR**