

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

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

## **Análise do processo de aspersão térmica do zinco e suas qualidades de proteção para estruturas de aço, com foco em condições de parques eólicos.**

William M. Marques<sup>a</sup>, Frank E. Goodwin<sup>b</sup>

### **Abstract**

Thermal sprayed Zn, Zn-15%Al and Al coatings have been industrially available for many years and are a practical solution for protection of steel structures used for wind energy applications in expected atmospheric environments. In most on-shore environments including rural, industrial and environments near (but not next to) the sea, many years of experience and testing show that a sprayed coatings alone, preferably with a sealer, can give a life of 20-25 years before extensive maintenance is required. For seaside and off-shore environments, the addition of a suitable paint system on the sprayed Zn base can provide this service life. The Zn-15%Al coating has been shown from extensive testing to be the best combination of Zn and Al, offering optimum barrier and sacrificial protection when sprayed on steel. After a review of the thermal spray process, corrosion data are reported for protective coating systems for exposure conditions of interest to the wind power industry.

**Keywords:** thermal spraying, zinc, corrosion, coating, protection, maintenance.

### **Resumo**

A aspersão térmica de Zn, Zn-15%Al e os revestimentos de Al foram industrialmente disponibilizados há muitos anos e são uma solução prática para a proteção de estruturas de aço utilizadas para aplicações de energia eólica em diferentes ambientes atmosféricos. Na maioria dos ambientes *onshore*, incluindo ambientes rurais, industriais e ambientes próximos (mas não ao lado) do mar, muitos anos de experiência e testes mostram que um revestimento aplicado isoladamente, de preferência com um selante, pode dar vida de 20 a 25 anos até que uma extensa manutenção geral seja necessária. Para ambientes de praia e *offshore*, a adição de um sistema de tinta adequado à base de Zn aspergido pode fornecer essa vida de serviço. O revestimento de Zn-15%Al demonstrou-se, a partir de amplos testes, como a melhor combinação de Zn e Al, oferecendo a melhor proteção de barreira e de sacrifício quando aspergido sobre o aço. Depois de uma análise do processo de aspersão térmica, os dados de corrosão são relatados para sistemas de revestimento de proteção com as condições de exposição de interesse para a indústria de energia eólica.

**Palavras-chave:** aspersão térmica, zinco, corrosão, revestimento, proteção, manutenção.

<sup>a</sup> Engenheiro de Desenvolvimento de Mercado – IZA – International Zinc Association

<sup>b</sup> Diretor de Tecnologia e Desenvolvimento de Mercado - IZA – International Zinc Association

---

## Introdução

---

A indústria de energia eólica é apenas um dos muitos desenvolvimentos globais de grande escala que requerem o uso de grandes estruturas de engenharia. Em quase todos estes, o aço desempenha um papel importante na função da estrutura e deve geralmente ser protegido contra a corrosão. Sistemas de revestimentos novos ou aprimorados que aumentam a durabilidade dessas estruturas, quer inorgânicas, quer orgânicas ou uma combinação das duas, continuam a ser desenvolvidos. A aplicação destes sistemas deve ser prática, proporcionar a vida de serviço requerida (no caso de estruturas de turbinas eólicas, 20 a 25 anos antes de amplas manutenções) sem afetar as propriedades funcionais da estrutura de aço. Juntamente com estes requisitos econômicos e de engenharia, o sistema de proteção contra corrosão deve ter um impacto mínimo sobre o meio ambiente. Nos EUA, Europa e Japão<sup>1, 2</sup> Zn, Zn-15%Al aspergido e revestimentos Al estão ganhando importância devido ao seu baixo impacto ambiental, resistência à corrosão, custo X benefício, durabilidade e outras vantagens em relação aos sistemas de pintura. Em muitos casos, os revestimentos de metal aspergido podem ser combinados com os sistemas de pintura para fornecer um efeito sinérgico, isto é, a vida útil combinada dos sistemas de proteção por aspersão e por pintura do metal é maior do que a vida desses sistemas adicionados separadamente + sistemas de aspersão de metal.

O objetivo deste trabalho é analisar os processos utilizados para aplicar o zinco por aspersão térmica com o desempenho de corrosão de revestimentos metálicos Zn, Zn-15%Al e Al aspergidos em estruturas de energia eólica. Isto incluirá a consideração de comportamento em diferentes ambientes e da relação entre a espessura de revestimento e a expectativa de vida.

### A família de revestimentos à base de zinco

---

Os revestimentos contendo zinco sobre o aço fornecem uma barreira de proteção contra a corrosão e, uma proteção de sacrifício devido à capacidade do zinco de se corroer preferencialmente, permitindo, portanto, que o aço permaneça não corroído mesmo que exposto a arranhões, arestas desprotegidas e outras áreas expostas. Os produtos da corrosão de zinco formados durante a corrosão também participam como uma barreira a mais para a corrosão, pois seu volume não é muito diferente do volume do zinco metálico. Em contraste, os produtos de corrosão de ferro são muito mais amplos do que o volume do ferro a partir do qual eles foram feitos. A corrosão do ferro (ferrugem) deixa o aço desprotegido e, de fato, a corrosão pode ser acelerada devido à natureza porosa dos produtos de corrosão do ferro. A capacidade do zinco de proteger o aço em áreas danificadas não pode ser oferecida por revestimentos orgânicos e é de grande utilidade quando há risco de danos ao revestimento, por exemplo, durante as operações de transporte, construção ou acesso.

Há seis maneiras de aplicar um revestimento contendo zinco ao aço:

1. Aspersão térmica: Superfícies que passaram por jateamento abrasivo são revestidas com gotículas de zinco semiderretidas ou liga de zinco e alumínio aspergidas com uma pistola abastecida por um fio, ou raramente, pó para formar um revestimento mecanicamente aderente;

2. Zincagem por imersão a quente (galvanização): O aço limpo é imerso no zinco líquido e a reação ocorre de modo a formar um revestimento metalurgicamente ligado ao aço.
3. Revestimentos com pó de zinco ou floco: incluem muitos tipos de tintas, e, geralmente, contêm zinco suficiente para que possam conduzir eletricidade.
4. Eletrodeposição de zinco: Sais de zinco são eletroliticamente depositados em uma superfície de aço limpa.
5. Revestimento mecânico: Peças de aço pequenas são roladas em pó de zinco à temperatura ambiente.  
A deposição de vapor de zinco também é usada.
6. Sherardização: Pequenas peças são roladas em zinco, logo abaixo do ponto de fusão do zinco para formar um revestimento metalurgicamente ligado.

Destes seis processos, apenas dois são relevantes para o revestimento de zinco das grandes estruturas de aço normalmente usadas para a energia eólica: aspersão térmica e zincagem por imersão a quente (galvanização). A aspersão térmica é muito versátil e pode ser aplicada na fábrica ou no local. Ela requer condições secas para aplicação, com uma temperatura sempre acima de 5 °C mais elevada do que o ponto de orvalho local do ar. No entanto, a aspersão é um processo de "campo de visão" e não pode ser usada para revestir superfícies escondidas do aço. A zincagem por imersão a quente é um processo de imersão e, portanto, capaz de revestir superfícies escondidas. No entanto, o comprimento dos banhos de zincagem por imersão a quente varia de 7 m a cerca de 14 m. Os banhos mais longos aceitam imersão de peças de aço maiores, primeiro imergindo uma ponta e depois a outra, mas esta é uma prática demorada e cara. A zincagem por imersão a quente só pode ser aplicada em aço em uma fábrica, não sendo possível aplicar no local. Ela provou ser um meio econômico para aplicar revestimentos a construções de aço que podem ser transportadas para a fábrica e mergulhadas no banho de zinco.

### **Processos de aspersão térmica**

---

A aspersão térmica normalmente envolve três etapas: limpeza da superfície através da retirada do óleo e outros contaminantes; preparação da superfície, que geralmente consiste no jateamento abrasivo e aspersão. Após a aspersão, o revestimento é geralmente selado, a menos que deva ser pintado para proporcionar uma proteção extra ao aço. Os principais revestimentos metálicos aspergidos são Zn, Zn-15%Al e Al puro. O Zn aspergido tem sido utilizado internacionalmente desde 1920. Os revestimentos de Zn-15%Al aspergidos estão disponíveis desde o final dos anos 1970. O alumínio pode ser passivado tanto no ar quanto em muitas soluções aquosas, possuindo boas propriedades resistentes à corrosão enquanto age como barreira sobre o aço, no entanto, exceto em certos ambientes, o alumínio é incapaz de fornecer proteção de sacrifício ao aço, como é possível com zinco. O alumínio também é suscetível à rachadura e corrosão localizada. A liga de Zn-15%Al aspergida provou ser a melhor combinação desses dois elementos em ambientes atmosféricos relevantes para estruturas de energia eólica enquanto revestimento aspergido, oferecendo tanto uma proteção por barreira quanto proteção de sacrifício às estruturas de aço.

Os métodos de aspersão térmica são classificados de acordo com a norma DIN EN 657, de acordo com o tipo de metal a ser abastecido para aspersão, a fonte de energia térmica para a fusão e a fonte de energia para aspergir o metal no alvo a ser revestido. Os processos mais amplamente utilizados para o Zn, Zn-15%Al e Al são o processo de aspersão por arco elétrico com dois fios, mostrado na Figura 1, e o processo de aspersão por chama, na Figura 2. Distâncias de aspersão entre 15 e 30 cm entre a ponta do aspersor e o aço que recebe o revestimento aspergido são comuns. O caráter das gotículas de metal aspergido é dado pela velocidade de entrada de energia térmica à câmara de combustão, a velocidade de alimentação de massa do fio e o caráter da aspersão dada pela chama, em conjunto com a distância entre o aspersor e o alvo. Depois das gotículas de aspersão de metal serem ejetadas do aspersor em forma líquida, elas podem tornar-se revestidas com uma pequena quantidade de óxido, dependendo do gás de aspersão, e podem parcialmente se solidificar antes de colidir com o substrato. Normalmente, as gotículas se encontram principalmente em estado líquido ao atingirem o alvo e se achatam no momento do impacto, de modo que o revestimento se acumula a partir de camadas dessas gotas achatadas que se tornam imediatamente sólidas após o impacto. Devido a esta rápida solidificação, não há oportunidade para a ligação por difusão e, portanto, a força de ligação principal entre o revestimento e o alvo é desenvolvida por bloqueio mecânico.

Outro novo processo que está apenas começando a ser usado é o processo de aspersão a frio. No entanto, ele ainda se encontra em fase de desenvolvimento para o revestimento de Zn.

Para garantir uma boa força de ligação entre o alvo de aço e o revestimento de metal aspergido, uma rugosidade especificada deve ser aplicada à superfície do aço. O jateamento por abrasão é o mais usado, com base no impacto de um abrasivo, em vez do jateamento com granalha, que faz uso da granalha de aço, pois o abrasivo dá uma superfície mais áspera, permitindo uma melhor resistência de ligação de revestimento. O objetivo da preparação é remover imperfeições de superfície, tais como os óxidos de ferro, e fornecer um perfil de superfície sobre o alvo de aço que tem picos angulares e vales, provocados pelo impacto do abrasivo. A norma para a preparação de superfície é a EN 8501-1 Grau SA3. O perfil de jateamento não deve exceder (100-125)  $\mu\text{m}$ , ou a rugosidade excessiva da superfície aspergida, mesmo após a aplicação de 100  $\mu\text{m}$  de revestimento metálico aspergido, persistirá. Um perfil típico de superfície de aço produzido pelo material abrasivo é mostrado na Figura 3, que mostra o perfil angular favorável produzido pelo material abrasivo.

Uma grande vantagem do processo de aspersão térmica de zinco é que os revestimentos podem ser aplicados sem entrada de calor significativa. Desta maneira, as propriedades do aço de base e as zonas soldadas, não serão alteradas pelo calor da aplicação por aspersão térmica dos revestimentos.

Com relação à resistência de ligação, a força de aderência mínima de 3,5 MPa foi especificada para revestimentos aspergidos<sup>3</sup> de Zn e Zn-15%Al. No entanto, usando o teste de resistência padrão ASTM D4541, a força de aderência em uma superfície preparada 100 % por abrasivo foi relatada como 6,2 MPa para Zn com um desvio padrão de 0,25 MPa e 10,4 MPa para Al com um desvio padrão<sup>4</sup> de 1,81 MPa.

Por ser um ponto de fusão menor, revestimentos aspergidos mais elevados no teor de Zn derretem mais rapidamente e proporcionam uma produtividade maior do que o Al. O zinco pode ser aspergido manualmente com o arco voltaico ou por processos de aspersão por chama a uma velocidade máxima de 50 kg por hora<sup>5</sup>, sendo típicos (30 a 35) kg/h para uma máquina de aspersão com arco voltaico de 350 A. Um equipamento automático pode aumentar essa taxa para 300 kg/h<sup>6</sup>. Em contraste, a taxa de massa de fusão de Al é de 25 % desta, e a da liga Zn-15%Al é 75 % da taxa de Zn. No entanto, tendo em conta as densidades mais baixas destes revestimentos em comparação com o zinco, a taxa de aplicação de espessura de alumínio é de 66 % do zinco e a da liga Zn-15%Al é de 93 % da taxa do zinco. Outro fator que afeta a produtividade é a eficiência da deposição do material. Tem sido demonstrado que essa eficiência aumenta com o aumento do teor de Al<sup>5</sup>. A eficiência de deposição varia de 60 % para Zn puro até 72 % para a liga Zn-15%Al.

As taxas de aspersão e as eficiências de aspersão têm consequências diretas na taxa de cobertura em m<sup>2</sup>/h. Por exemplo, a espessura típica de 100 µm do revestimento especificada para Zn requer 540 g/m<sup>2</sup>. Dada uma eficiência de 60 %, isso significa que 50 m<sup>2</sup> de superfície de aço requerem 45 kg de zinco para o revestimento, de modo que 40 m<sup>2</sup>/h é um bom valor para estimar a taxa de revestimento de superfícies de aço depois de outras operações, à medida que o movimento do aplicador de uma área para a próxima e outras tarefas forem incluídas.

Após a aspersão térmica, o revestimento metálico é selado, se não tiver de ser pintado. A impermeabilização é muito diferente da pintura; os impermeabilizadores são de baixa viscosidade e penetram nos poros do revestimento aspergido. A espessura total do revestimento não é aumentada por meio da impermeabilização. O impermeabilizador reduz a superfície exposta ao ambiente corrosivo e, por conseguinte, reduz a taxa de corrosão.

O impermeabilizador proporciona uma superfície mais lisa, reduzindo a captação de sujeira e outros contaminantes, preservando a aparência da superfície e reduzindo os custos de manutenção. Impermeabilizadores coloridos estão disponíveis para alterar a aparência da estrutura pulverizada. Um revestimento metálico aspergido e impermeabilizado é um sistema de proteção completo, adequado para muitas exposições ao ar livre, sem a necessidade de outros revestimentos de pintura. Muitos tipos de selantes foram examinados, incluindo poliuretano, fenólico, epóxi, tinta de base e silicatos<sup>7</sup> e todos mostraram melhora aos revestimentos aspergidos não revestidos.

### **Características de revestimentos por aspersão térmica**

Micrografias representativas dos revestimentos por aspersão térmica da liga Zn, Zn-15%Al e de Al são mostrados nas Figuras 4, 5 e 6. Devido ao fato de que estes revestimentos aspergidos por arco foram aspergidos com ar normal, óxidos estão presentes nas estruturas de revestimento, no entanto, mais óxidos podem ser observados no revestimento de Al. Estas microestruturas são relativamente densas, sendo o revestimento de alumínio mais poroso e tendo uma superfície mais rugosa. A aparência do revestimento de alumínio é devida à formação de óxidos sobre as partículas de alumínio durante a aspersão e a temperatura de fusão mais alta do alumínio, o que resulta em um maior grau de solidificação das partículas de alumínio no impacto em comparação com o zinco. Em todos os casos, a taxa de aplicação por

aspersão aumentou com a corrente de arco, e não é muito afetada por outras variáveis, como fluxo de gás ou velocidade<sup>8</sup>.

Vários estudos de corrosão de longo prazo têm sido realizados em revestimentos de zinco *por aspersão térmica*. O primeiro deles foi um estudo de 19 anos da American Welding Society, que foi concluído em 1974<sup>9</sup>. Isso mostrou que tanto no ambiente marinho quanto no industrial, revestimentos aspergidos contendo Zn e Al forneceram proteção por 19 anos. Estes foram testados com e sem impermeabilizadores. Mais recentemente, um estudo de 34 anos na América do Norte expôs vários tipos de revestimentos de zinco aspergidos e mostrou os bons resultados de revestimentos com liga de Zn-Al<sup>10</sup>. Um estudo japonês de 18 anos também foi registrado, dando resultados em ambientes marinhos. Tanto o revestimento por arco e chama de Zn quanto o de Zn-Al foram expostos em ambientes marinhos do Japão. Alguns dos revestimentos mostraram bons desempenhos para o período total de 18 anos. Os japoneses também prepararam uma ampla análise da literatura, coletando de mais de 170 relatórios publicados e avaliando todas as informações disponíveis até a publicação do relatório, ocorrida em 2006<sup>1</sup>.

O desempenho da corrosão de revestimentos aspergidos está diretamente relacionado com a severidade da atmosfera. A norma ISO 9223 oferece classificações padronizadas para a capacidade de corrosão de atmosferas, como mostrado na Tabela 1. As taxas de corrosão esperadas para o aço e o zinco também são mostradas nesta tabela.

Uma comparação entre o desempenho dos diferentes revestimentos de zinco é mostrada na Tabela 2. Os revestimentos HDG são zincados por imersão a quente em peças pós-fabricação, chapas e tubos. As espessuras dos revestimentos de zinco por imersão a quente são diferentes para cada tipo de produto e a vida útil prevista em corrosão é proporcional à espessura do revestimento. O desempenho dos revestimentos aspergidos por chama com um impermeabilizador é mostrado para espessuras de (100 e 200)  $\mu\text{m}$  e mostra a vida máxima prevista e a classe de durabilidade da norma EN ISO 14713 para cada uma das classes de severidade de corrosão C3, C4, C5 e CX da norma ISO 9223.

O revestimento por aspersão térmica de Zn-15%Al foi introduzido no final dos anos 1970 e é a maior composição de alumínio em zinco que pode ser feita industrialmente em fio. Milhares de toneladas são utilizadas na Europa, América do Norte e Japão, e tem provado ser uma liga multiuso que eliminou a necessidade de escolher entre o zinco e alumínio. Devido ao fato de a microestrutura de cada uma das gotículas deste revestimento aspergido ser composta por uma fase rica em Al e rica em Zn, a corrosão da fase rica em Zn começa antes da corrosão da fase rica em Al. Os produtos de corrosão de zinco são, em seguida, colocados na camada porosa da fase rica em Al e não se acumulam em uma camada superficial contínua, como nos revestimentos de Zn. Os produtos de corrosão de Zn-15%Al são, por conseguinte, mais compactos do que qualquer um de Zn ou de Al e, portanto, ajudam a proteger o aço, mesmo que o revestimento de da liga Zn-15%Al tenha passado por corrosão<sup>11</sup>.

Uma compilação de 14 anos de dados de corrosão atmosférica de uma atmosfera japonesa industrial/costeira densa é mostrada na Figura 7, onde Zn, Al puro e Zn-15%Al são comparados com as condições pintadas com cada uma destas três camadas. Nesta atmosfera, o revestimento de Zn-15%Al aspergido sem pintura não apresentou perda de massa até depois de 6 anos de exposição, enquanto um pequeno ganho de massa foi observado no revestimento

aspergido de Al sem pintura. O revestimento aspergido de Zn sem pintura apresentou perda de massa contínua depois de 14 anos. Os revestimentos aspergidos pintados tiveram bom desempenho, com pouca perda de massa nas amostras de Zn-15%Al e de Al, e uma ligeira perda de massa com o revestimento de Zn aspergido pintado. Resultados de amostras galvanizadas, com e sem pintura, tiveram desempenho ligeiramente melhor do que os revestimentos aspergidos de Zn puro. Como esperado, a condição de aço apenas jateada teve um desempenho bem fraco<sup>12</sup>.

Vários estudos recentes sobre corrosão confirmaram o aumento do benefício de revestimentos de pintura adicionada resultando em maior desempenho contra a corrosão<sup>1,7,13</sup>. A Figura 8 mostra o desempenho de revestimentos aspergidos de Zn, Al e Zn-Al com diferentes tipos de impermeabilizadores. Em um ambiente marinho tropical, uma base melhorou significativamente o desempenho do revestimento de Zn-Al não tratado e também mostrou ser superior aos revestimentos aspergidos de Zn e Al puros, mesmo quando diferentes impermeabilizadores foram usados<sup>14</sup>.

---

## Conclusões

---

Revestimentos por aspersão térmica de Zn, Zn-15%Al e Al são soluções industriais práticas para proteção de estruturas de aço utilizadas para aplicações de energia eólica em ambientes atmosféricos diferentes. Muitos anos de experiência e testes mostram que um revestimento aplicado isoladamente, de preferência com um impermeabilizador, pode dar vida de 20 a 25 anos na maioria dos ambientes *onshore*, incluindo ambientes rurais, industriais e ambientes próximos (mas não ao lado) do mar, antes que uma extensa manutenção geral seja necessária. A adição de um sistema de tinta adequado ao revestimento metálico aspergido pode fornecer essa vida de serviço em ambientes de praia e *offshore*. O revestimento de Zn-15%Al demonstrou-se, a partir de amplos testes, como a melhor combinação de Zn e Al, oferecendo a melhor proteção de barreira e de sacrifício quando aspergido sobre o aço. Um sistema de revestimento devidamente selecionado oferece o potencial de satisfazer os requisitos de uma vida útil longa, juntamente com a proteção de áreas danificadas do revestimento, reduzindo significativamente os custos de manutenção ao longo da vida útil da estrutura.

Para ajudar no desenvolvimento do conhecimento e da consciência dos revestimentos por aspersão térmica contendo Zn para proteção contra corrosão do aço, a Associação Internacional do Zinco organizou um Grupo de Desenvolvimento de Aspersão Térmica do Zinco. Através do seu site [www.zinc.org](http://www.zinc.org) e apresentações como esta, o Grupo espera ser um local para o desenvolvimento e distribuição de informações sobre revestimentos por aspersão térmica de Zn.

---

## Referências bibliográficas

---

1. S. Kuroda, J. Kawakita, and M. Takemoto (2006) **An 18-Year Exposure Test of Thermal-Sprayed Zn, Al, and Zn-Al Coatings in Marine Environment**. Corrosion: July 2006, v. 62, n.7, p. 635-647.
2. R. A. Kogler, D. Brydl, and C. Highsmith, **“Recent FHWA experience with metallized coatings for steel bridges,”** Materials Performance, v. 38, n. 4, p. 43–45, 1999.

3. DVS-Merkblatt 2302 **Korrosionsschutz von Stählen und Gusseisenwerkstoffen durch thermisch gespritzte Überzüge**, DSV-Verlag 2003
4. W.T. Young and J. Repp, “**Application and Performance of Thermally sprayed Aluminum and Zinc on Steel**”, NACE Paper 04719, presented at Corrosion 2004 Annual Conference and Exhibition, New Orleans, USA
5. F. Prenger and J. Spriestersbach, “**Thermal Spraying of Zinc and Zinc-Aluminium Alloys for Corrosion Protection**”, Thermal Spray 2012: Proceedings from the International Thermal Spray Conference and Exposition, May 21–24, 2012, Houston, Texas, USA
6. M. Knepper, SLV-Duisburg 2002, **Das Lichtbogenspritzen- Anlagentechnik und Anwendungen**
7. H. Kanematsu, D. M. Barry, P. McGrath and A. Ohmori, “**Corrosion Protection of a Metal Spray Coating By Using An Inorganic Sealing Agent for Its Micropores**”, Proceedings from the International Thermal Spray Conference and Exposition, Osaka, Japan, May 10-12, 2004
8. A. Gulec, O. Cevher, A. Turk, F. Ustel and F. Yilmaz, “**Accelerated Corrosion Behaviors of Zn, Al and Zn/15Al Coatings on a Steel Surface**”, Materials and technology 45 (2011) 5, 477–482
9. American Welding Society, “**Corrosion Tests of Flame-Sprayed Coated Steel 19 Year Report**”, 1974, [http://www.inmetl.com/19\\_year\\_report.htm](http://www.inmetl.com/19_year_report.htm)
10. R. Kain, **Marine Atmospheric Corrosion Museum Report on the Performance of Thermal Spray Coatings on Steel**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa, USA, 1987.
11. B-L Lin, X-Y Lu and L. Li, “**Corrosion behaviors of arc spraying single and double layer coatings in simulated Dagang soil solution**”, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 19(2009) 1556–1561
12. J.T. Butler and H. Morrow, “**Corrosion Performance of Thermal Sprayed Zinc-aluminum Alloys**”. Typescripts obtained from authors, 1988 and 1990, produced for USA Zinc Metallizers Task Group
13. O. Knudsen and A. Bjoergum and L.T. Doessland, “**Long-Life, Low-Maintenance Coating Systems**”, Materials Performance, June 2012, pp. 54-59
14. O. Salas, O. Troconis de Rincon, D. Rojas, A. Tosaya, N. Romero, M. Sanchez, and W.Campos, “**Six-Year Evaluation of Thermal-Sprayed Coating of Zn/Al in Tropical Marine Environments**”, International Journal of Corrosion, Volume 2012, Article ID 318279
15. S. Barker, **Metallisation**, private communication

**Tabela 1. ISO 9223:2012 Categorias de Corrosividade e Taxas de Corrosão Correspondentes de Aço e Zinco**

ISO 9223		Ambiente típico	Taxa de corrosão para o primeiro ano de exposição ( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	
Categoria	Descrição		Aço	Zinco
C1	Muito baixa	Interiores secos	$\leq 1.3$	$\leq 0.1$
C2	Baixa	Árido/Urbano em terra	$> 1,3 \text{ a } \leq 25$	$>0,1 \text{ a } \leq 0,7$
C3	Média	Costeira ou industrial	$>25 \text{ a } \leq 50$	$>0,7 \text{ a } <2,1$
C4	Alta	Litoral com mar calmo	$>50 \text{ a } \leq 80$	$>2,1 \text{ a } \leq 4,2$
C5	Muito alta	Litoral com mar agitado	$>80 \text{ a } \leq 200$	$>4,21 \text{ a } \leq 8,4$
CX	Extrema	Oceano/Offshore	$>200 \text{ a } \leq 700$	$>8.4 \text{ a } \leq 25$

**Tabela 2. Desempenho contra corrosão de revestimentos de zinco sobre metal de acordo com a normal EN ISO 14713-1:2009**

Sistema	Padrão de referência	Espessura mínima ( $\mu\text{m}$ )	Categoria selecionada de corrosão (ISO 9223) min./máx (anos) e classe de duração (VS, S, M, L, LV)							
			C3		C4		C5		CX	
HDG	EN ISO 1461	85	40/121	VL	20/40	VL	10/20	L	3/10	S
		140	67/200	VL	33/67	VL	17/33	L	6/17	M
		200	95/286	VL	48/95	VL	24/48	VL	8/24	M
Placa HDG	EN 10326	20	10/29	L	5/10	S	2/5	S	1/2	VS
		42	20/60	VL	10/20	L	5/10	M	2/5	S
Tubo HDG	EN 10240	55	26/79	VL	13/26	L	7/13	M	2/7	S
Galvanizado por vapor	EN 13811	15	7/21	M	4/7	S	2/4	S	1/2	VS
		30	14/43	L	7/14	M	4/7	S	2/4	VS
		45	21/65	VL	11/25	L	6/11	M	3/6	S
Aspergido termicamente por chama (impermeabilizado)	EN ISO 2063	100	48/143	VL	24/48	VL	12/24	L	4/2	S
		200	95/286	VL	48/95	VL	24/48	VL	8/24	M
Placa eletrodepositada	EN 12329	5	2/7	S	1/2	VS	1/1	VS	0/1	VS
		25	12/36	L	6/12	M	3/6	S	1/3	VS
Eletrodeposição mecânica	EN ISO 12683	8	4/11	S	2/4	S	1/2	VS	0/1	VS
		25	12/36	L	6/12	M	3/6	S	1/3	VS

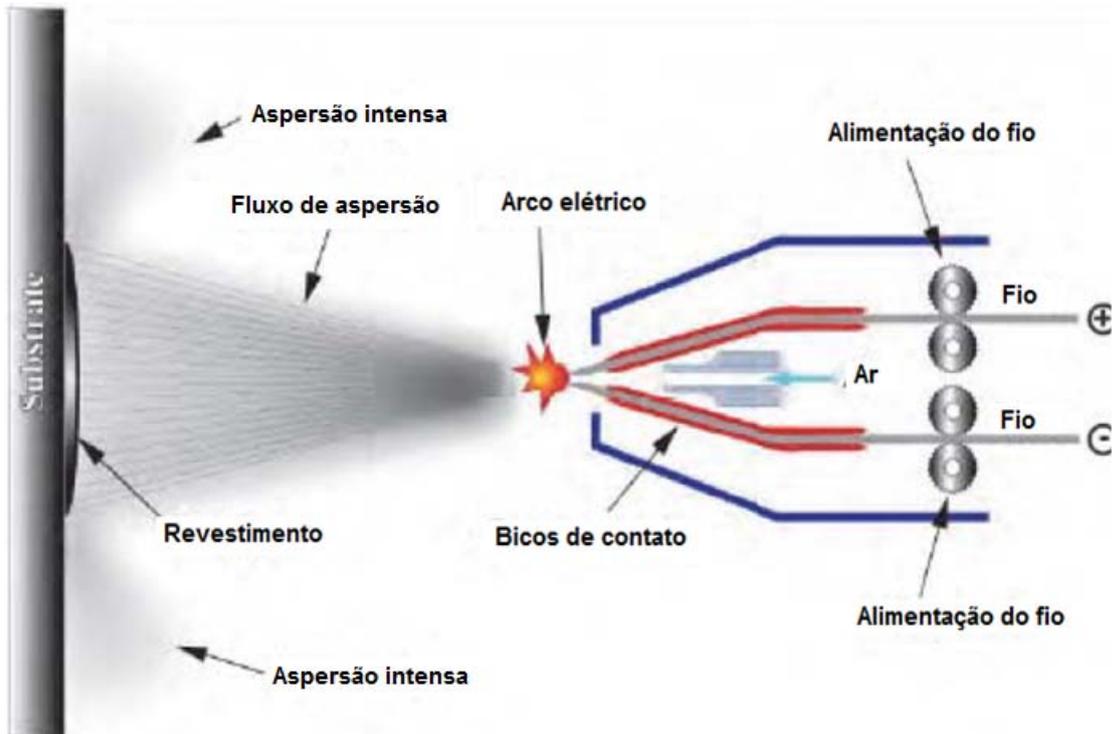


Figura 1. Diagrama esquemático da aspersão por arco com dois fios (Fonte: Referência 5)

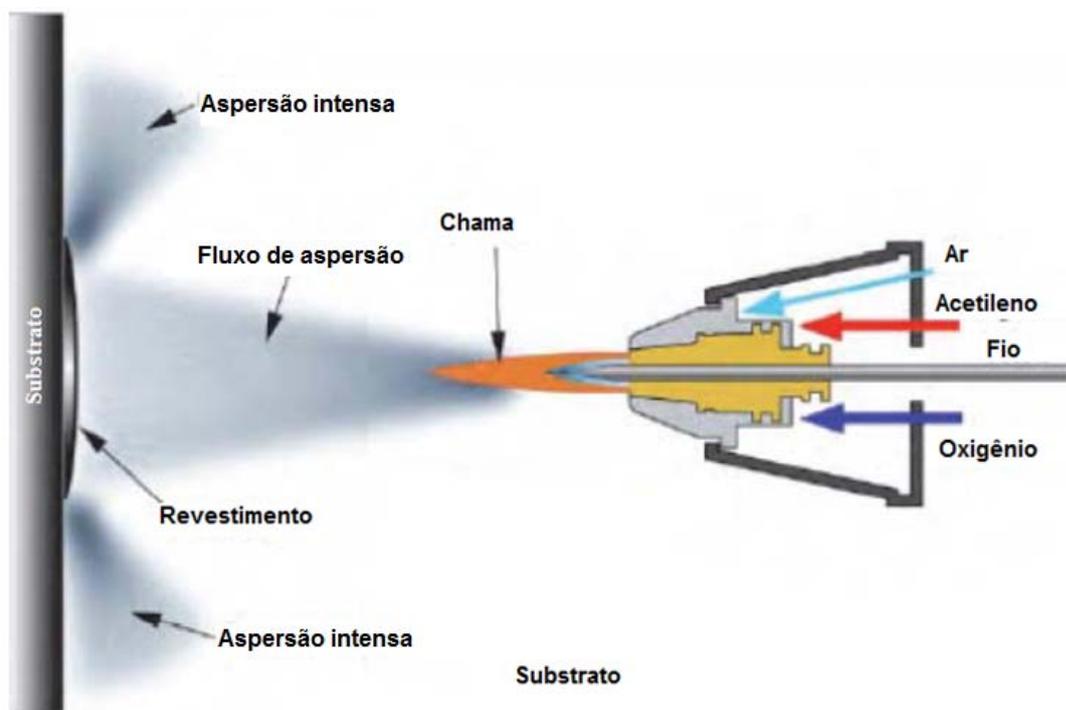


Figura 2. Diagrama esquemático da aspersão por chama (Fonte: Referência 5)

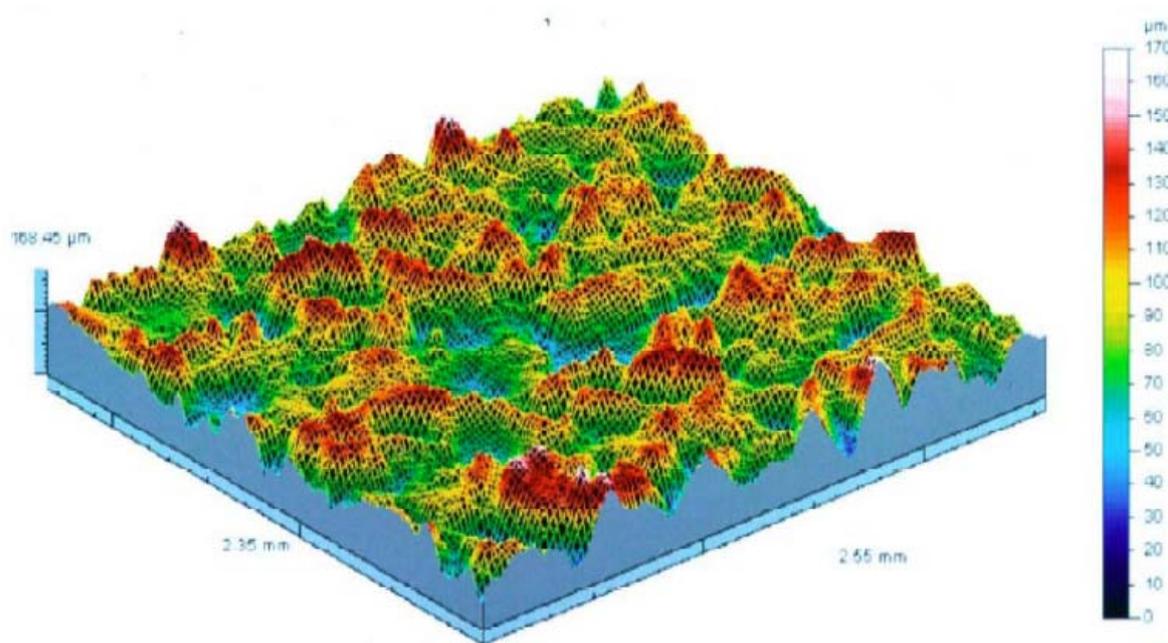


Figura 3. Perfil de rugosidade superficial em aço obtido após o preparo correto por jateamento abrasivo (Fonte: Referência 15)

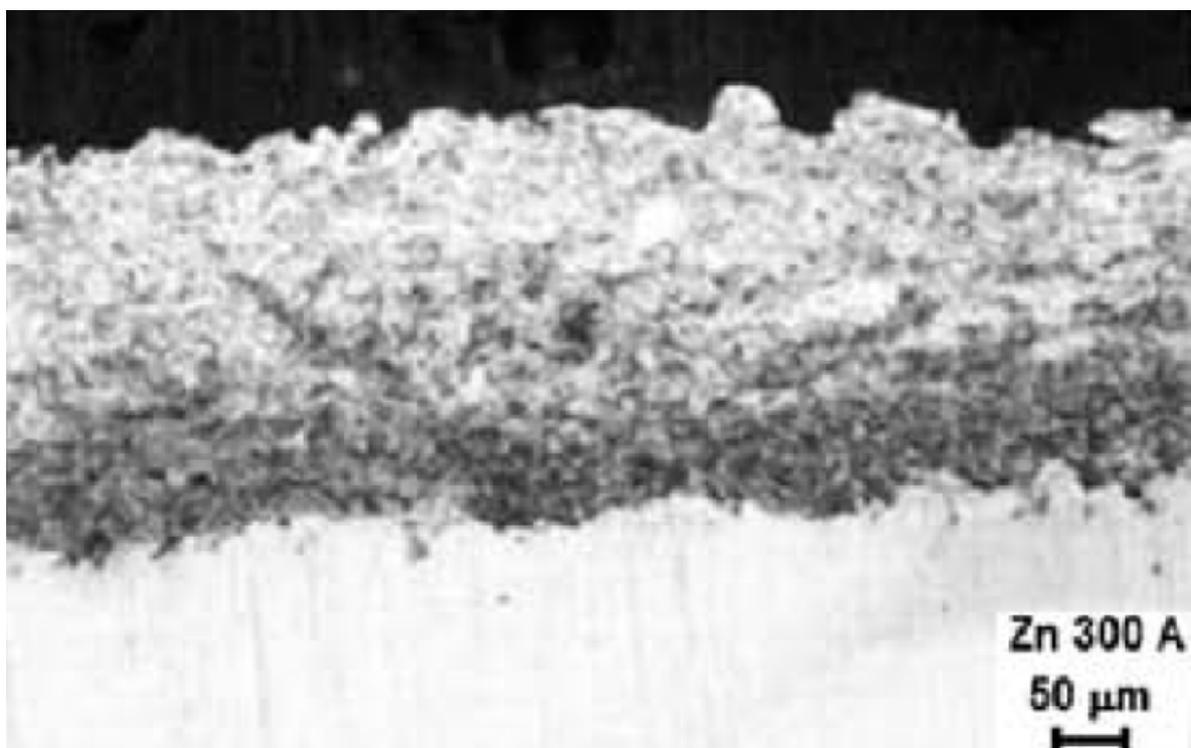


Figura 4. Revestimento de zinco puro aspergido sobre aço com arco de 300 ampères e 24 volts (Fonte: Referência 8)

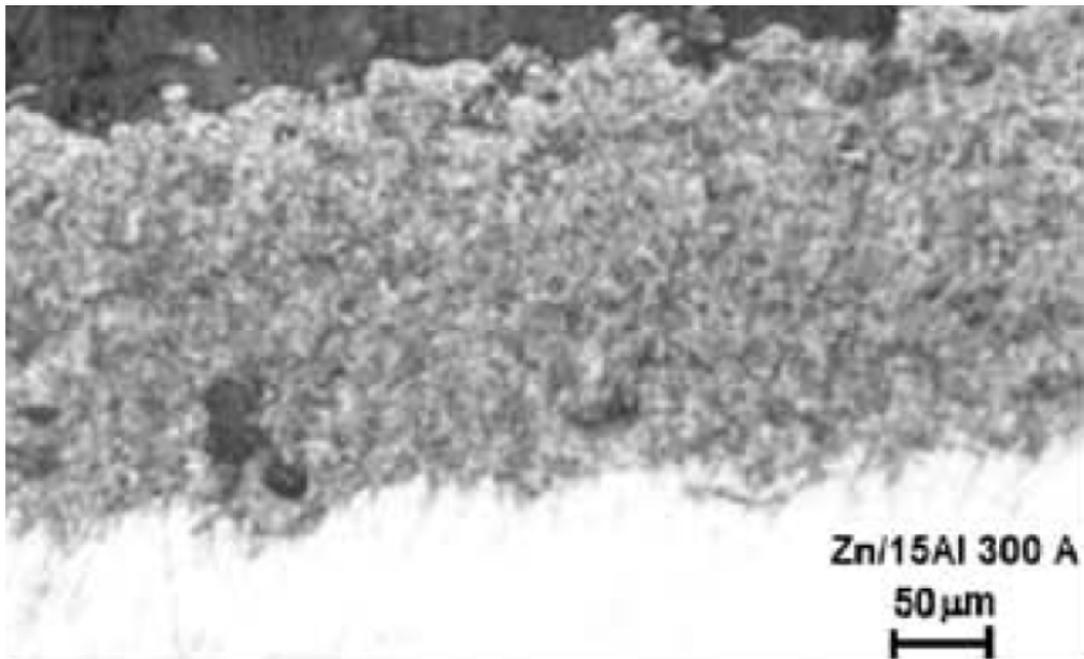


Figura 5. Revestimento de Zn-15%Al aspergido com arco sobre aço com arco de 300 ampères e 26 volts (Fonte: Referência 8)

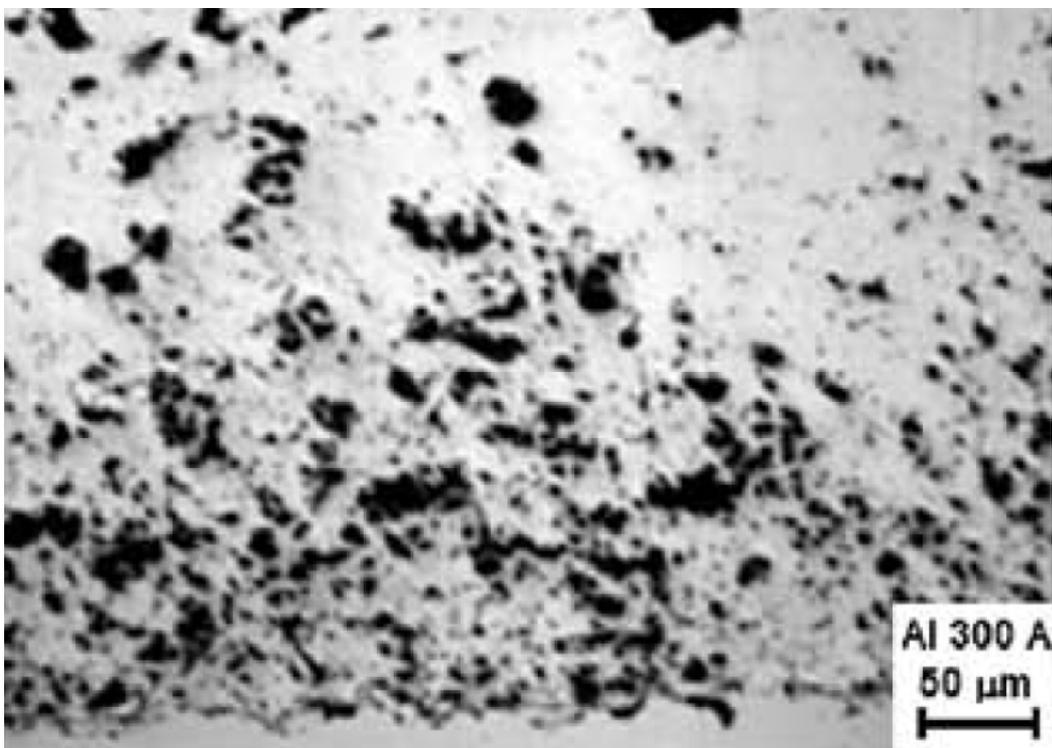


Figura 6. Revestimento de Al puro aspergido com arco sobre aço com arco de 300 A e 23 V (Fonte: Referência 8)

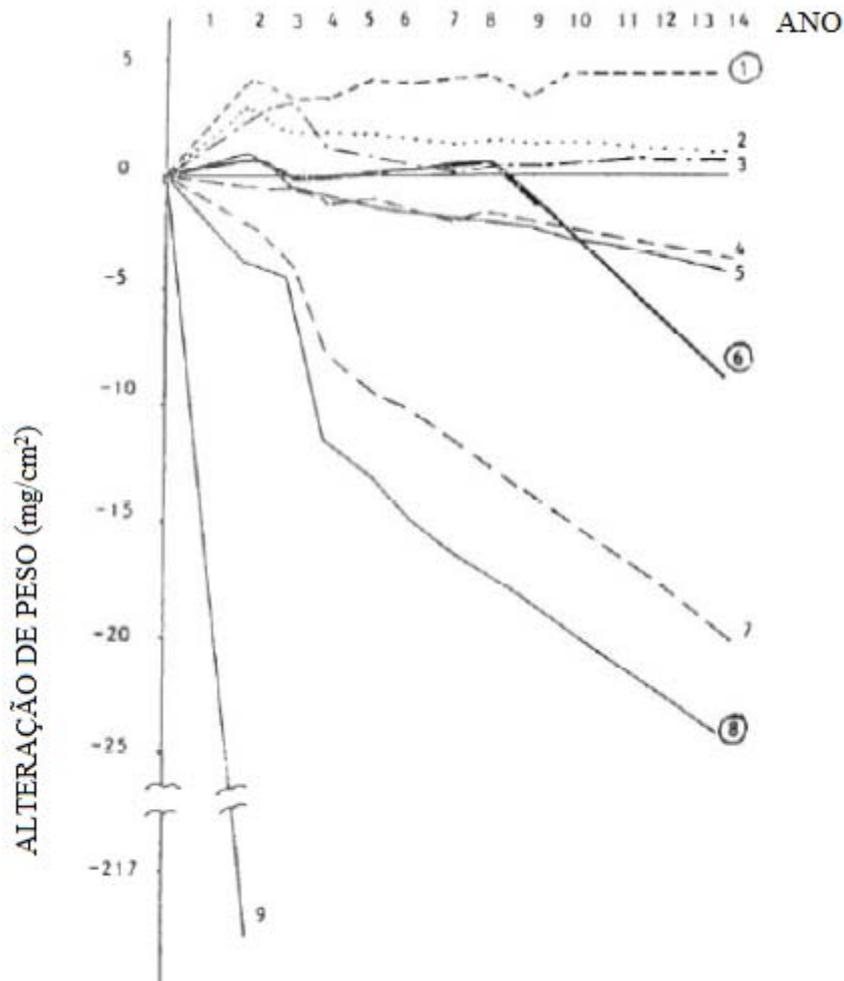
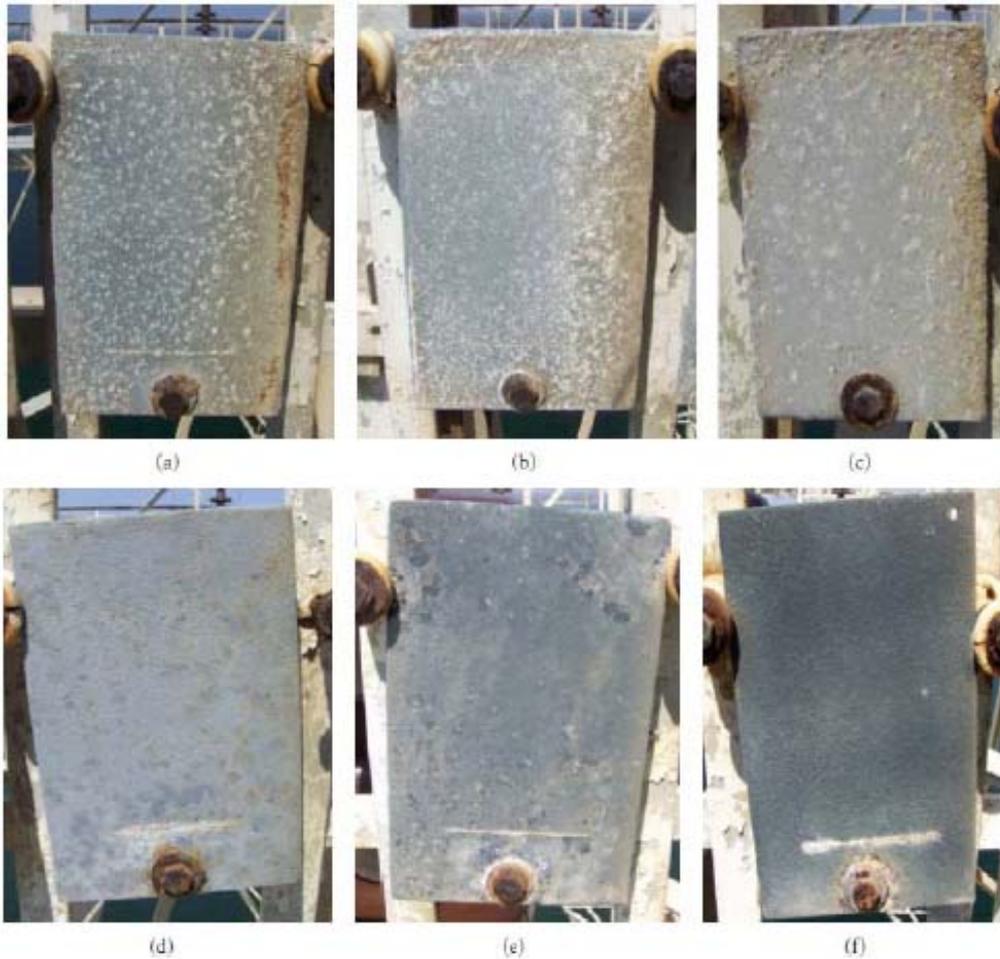


Figura 7. Variação da massa de amostras de aço revestidas expostas por 14 anos na atmosfera industrial/costeira classe 5 ISO 9223 do Japão. 1 =Al aspergido, 2=pintura em Al aspergido, 3=pintura em Zn-15Al aspergido, 4=pintura em galvanização, 5=pintura em Zn aspergido, 6=Zn-15AL aspergido, 7=galvanização, 8=Zn aspergido, 9=aço apenas jateado (Fonte: Referência 12)



**Figura 8. Comparação de diferentes sistemas impermeabilizados expostos no Lago de Maracaibo, Venezuela, um ambiente marinho tropical após 41 meses de exposição (a) zinco aspergido com chama, impermeabilizado com base (173  $\mu\text{m}$ ). (B) Zinco aspergido com arco, impermeabilizado com base (264  $\mu\text{m}$ ). (C) Zinco aspergido com arco, impermeabilizado com fenólico (261  $\mu\text{m}$ ) (66 meses de exposição). (D) Alumínio aspergido com arco com fenólico (261  $\mu\text{m}$ ). (e) Alumínio aspergido com arco, impermeabilizado com base (251  $\mu\text{m}$ ). (e) Zn/Al aspergido com chama, impermeabilizado com base (345  $\mu\text{m}$ ). Fonte: Referência 14)**