

# INFLUÊNCIA DA MASSA DA CAMADA DE ZINCO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS ELETROGALVANIZADOS FOSFATIZADOS E PINTADOS<sup>1</sup>

*Evandro de Azevedo Alvarenga<sup>2</sup>*

*José Geraldo Moreira<sup>3</sup>*

*Vicente Tadeu Lopes Buono<sup>4</sup>*

## **Resumo**

Neste estudo avaliou-se a influência da massa da camada de zinco na resistência à corrosão atmosférica de aços eletro galvanizados, fosfatizados e pintados. Foram utilizados dois tipos de aços eletro galvanizados, um com substrato de aço carbono para estampagem, denominado Usigalve, e outro com substrato de aço USI-R-COR-III, também para estampagem, mas com característica de resistência à corrosão, designado Usigalve/Plus. A resistência à corrosão foi determinada por meio de testes acelerados e não-acelerados de corrosão, utilizando-se câmaras de testes cíclicos e as estações de corrosão atmosférica industrial e marinha da Usiminas. Os parâmetros medidos foram o avanço médio e a penetração máxima da corrosão, empregando-se técnicas de análise de imagem. Este estudo mostrou que a massa da camada de zinco exerce papel preponderante na resistência à corrosão atmosférica dos aços eletro galvanizados fosfatizados e pintados. Além disso, verificou-se também que é perfeitamente possível utilizar massas de camada de zinco menores, sem comprometer a resistência à corrosão do material, desde que o substrato metálico apresente características de resistência à corrosão atmosférica (aço baixo carbono versus aço USI-R-COR-III), contribuindo dessa forma para a melhoria da conformabilidade dos aços revestidos com zinco.

**Palavras-chave:** Resistência à corrosão; Eletro galvanização; Pintura; Conformação.

## **INFLUENCE OF THE ZINC LAYER MASS ON THE CORROSION RESISTANCE OF PHOSPHATIZED AND PAINTED ELECTROGALVANIZED STEELS**

### **Abstract**

The influence of the mass of the zinc layer in the resistance to atmospheric corrosion of electro galvanized steel sheets phosphatized and painted was evaluated. Two types of electro galvanized steels were used: one carbon steel for drawing as metallic substrate, Usigalve, and other, Usigalve/Plus, having as substrate USI-R-COR-III, a steel resistant to atmospheric corrosion. The resistance to atmospheric corrosion was determined by means of accelerated and non-accelerated corrosion tests, using, respectively, chambers of cyclical tests and atmospheric corrosion stations of Usiminas. The measured parameters were the average advance and the maximum penetration of the corrosion. Results showed that the mass of the zinc layer has a strong influence in the atmospheric corrosion resistance of phosphatized and painted electro galvanized steel sheets. Moreover, it was also verified that it is perfectly possible to use lower masses of zinc layer, without compromising the resistance to corrosion, when the substrate presents characteristics of atmospheric corrosion resistance (USI-R-COR-III steel), contributing for the improvement of the formability of steel coated with zinc.

**Key words:** Corrosion resistance; Electro galvanizing; Painting; Formability.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

<sup>2</sup> *Membro da ABM; Engenheiro Químico, M. Sc., CQE/ASQ, Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

<sup>3</sup> *Técnico em Química, Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG*

<sup>4</sup> *Membro da ABM; Físico, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, MG.*

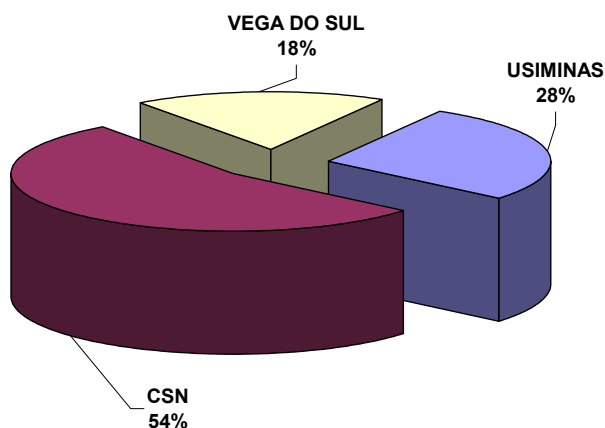
## 1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores mudanças ocorridas nos últimos anos em relação à aplicação do aço como elemento estrutural, foi a utilização de aços revestidos com zinco para situações que exigem maior resistência à corrosão.

O consumo de zinco vem aumentando ano a ano. Os 21 países economicamente mais desenvolvidos são responsáveis por 86% da utilização global de zinco e somente a China contribui com 22% desse montante. A maior parte do zinco é destinada à produção de chapas galvanizadas; destacando-se como os principais consumidores as indústrias automobilística (32%), da construção civil (28%) e elétrica/eletrônica (18%).<sup>(1)</sup>

A produção de aços revestidos com zinco no Brasil iniciou-se há algumas décadas e atendia principalmente aos setores de distribuição, da construção civil, de tubos de pequeno diâmetro e de utilidades domésticas. A partir da década de 80 esses setores começaram a procurar por novas matérias-primas para a fabricação de produtos mais duráveis, com maior resistência à corrosão e compatíveis com similares existentes no mercado internacional, encontrando nas chapas galvanizadas o material ideal para esse objetivo.

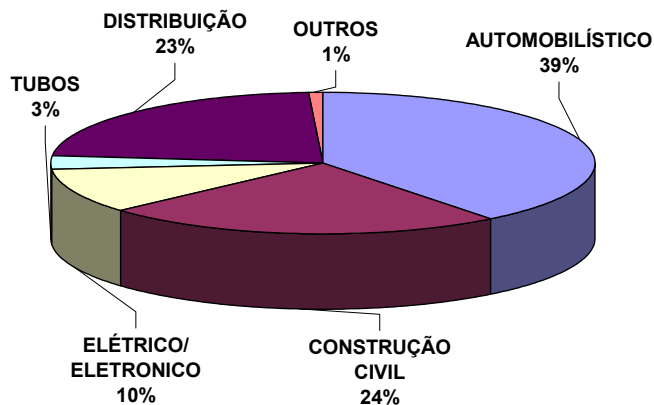
Atualmente a capacidade brasileira de produção de chapas revestidas com zinco é de 2.740 mil t/ano, dividida praticamente entre três grandes produtores, conforme apresentado na Figura 1.



**Figura 1.** Participação dos principais produtores de chapas revestidas com zinco no mercado brasileiro. Fonte: Superintendência de Marketing do Sistema Usiminas, julho/2005.

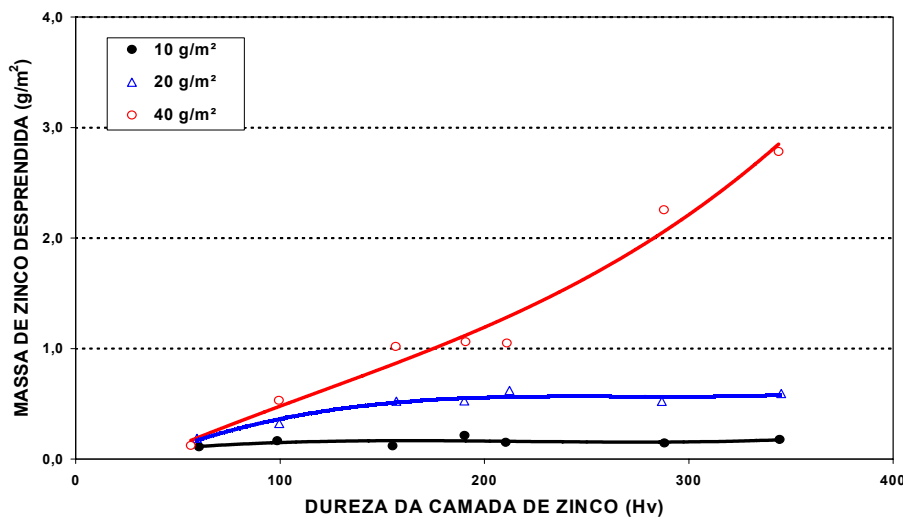
No Brasil o setor automotivo também é o grande responsável pela demanda de chapas revestidas, consumindo em 2004 cerca de 770 mil t. A participação no mercado interno dos principais usuários nacionais de chapas revestidas com zinco pode ser vista na Figura 2.

Um dos problemas que ocorre na utilização de aços galvanizados pelo setor automobilístico é o desprendimento de revestimento, uma vez que as partículas de zinco podem causar defeitos superficiais nos painéis durante os processos de conformação. Esse desprendimento se dá por dois fenômenos distintos: a formação de pós (*powdering*) e de lascas (*flaking*).



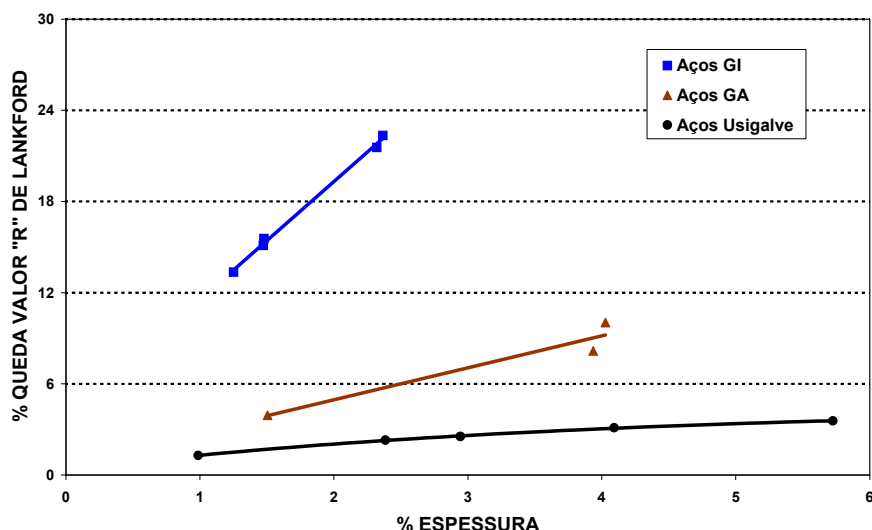
**Figura 2.** Principais setores consumidores de chapas revestidas com zinco no mercado brasileiro. Fonte: Superintendência de Marketing do Sistema Usiminas, julho/2005.

Segundo alguns autores, o desprendimento de zinco durante a conformação de chapas eletrolgalvanizadas é mais acentuado nos casos em que a camada de zinco é mais espessa e sua dureza mais elevada.<sup>(2-4)</sup> Hisamoto<sup>(2)</sup> avaliou o desprendimento de zinco em chapas eletrolgalvanizadas e concluiu que a dureza do revestimento é o parâmetro mais significativo, principalmente quando a massa da camada de zinco é superior a  $40 \text{ g/m}^2$ , Figura 3.



**Figura 3.** Relação entre dureza e massa da camada de zinco e o desprendimento de zinco em testes de arrancamento com rebordo<sup>(2)</sup>.

Estudos realizados pela Usiminas mostraram que a massa da camada de zinco influencia na conformabilidade (valor "R" de Lankford) dos aços laminados à frio mais utilizados pela indústria automobilística, Figura 4.<sup>(5)</sup> De acordo com essa Figura, a maior queda no valor "R" ocorre quando a espessura do revestimento é proporcionalmente maior em relação à espessura do aço base. Em outras palavras, isso significa que para uma mesma espessura de camada de zinco, aplicada em aços de mesma qualidade, mas com espessuras diferentes, a queda no valor "R" será maior para aquele aço base de menor espessura. Portanto, para melhorar a conformabilidade dos aços galvanizados para estampagem a camada de zinco deverá ser a menor possível. Esses resultados são válidos tanto para os aços eletrolgalvanizados (Usigalve), como para os aços galvanizados a quente (GI e GA).



**Figura 4.** Efeito da camada de revestimento na queda do valor "R" de Lankford de aços revestidos com zinco.<sup>(5)</sup>

No entanto, a redução da massa da camada de zinco dos aços deve seguir um critério técnico embasado não só no benefício obtido durante a conformação, mas também no da resistência à corrosão do material. Ao se reduzir demasiadamente a massa de zinco pode-se comprometer resistência à corrosão oferecida pelo material.<sup>(6)</sup>

Assim, apresenta-se neste estudo os resultados da influência da massa da camada de zinco na resistência à corrosão de dois aços eletrolgalvanizados produzidos pela Usiminas: os aços Usigalve e Usigalve/Plus, de forma a fornecer subsídios aos usuários na escolha da melhor massa de camada de zinco para suas aplicações.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

Corpos-de-prova, nas dimensões de 100 mm x 150 mm e espessura de 0,72 mm a 0,85 mm, foram preparados a partir de bobinas de aços carbono para estampagem, USI-R-COR-III, Usigalve e Usigalve/Plus. A fosfatização e a pintura dos corpos-de-prova foram feitas em uma indústria automobilística.<sup>(7)</sup>

A espessura e a aderência da película seca de tinta foram determinadas de acordo com as normas NBR 10443<sup>(8)</sup> e NBR 11003.<sup>(9)</sup> A espessura média foi de 110  $\mu\text{m}$ , com desvio padrão de 3  $\mu\text{m}$ , e a aderência pelo método da tração<sup>(7)</sup> variou de 1,54 MPa a 2,72 MPa, correspondendo ao "grau 0" pelo método da grade.

Antes de cada teste de corrosão a película seca de tinta, relativa à face superior do corpo-de-prova, foi danificada mecanicamente com uma ferramenta de usinagem com ponta de carbeto de tungstênio até atingir o metal base, conforme norma NBR 8754.<sup>(10)</sup>

Os testes acelerados de corrosão realizados foram os seguintes: os testes cíclicos Ciclado I e GM 9540P/B e o de campo com aspersão de solução salina.

O teste Ciclado I foi desenvolvido pela Usiminas e consiste na exposição de 10 corpos-de-prova para cada tipo de aço estudado em uma câmara específica para testes acelerados cíclicos de corrosão. Nessa câmara os corpos-de-prova recebem no primeiro dia aspersão de solução salina de NaCl a 5% p/v e à temperatura de  $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante 24h. Do segundo ao quinto dia os corpos-de-prova ficam expostos durante 8h em ambiente com umidade relativa maior do que 95% e à

temperatura de  $40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Em seguida a câmara de teste é desligada e aberta, permanecendo os corpos-de-prova na condição ambiente durante 16h. Nos sexto e sétimo dias os corpos-de-prova voltam a ficar expostos em ambiente de laboratório com a câmara desligada e aberta. A duração do teste foi de 1680h.

Os testes acelerados de corrosão GM 9540P/B e o de campo com aspersão de solução salina (atmosfera industrial), foram realizados de acordo com as normas GM 9540P/B<sup>(11)</sup> e ISO 11474,<sup>(7,12)</sup> com duração de 1920h e 3 anos, respectivamente. Para a realização do teste não-acelerado de corrosão com exposição em atmosfera marinha seguiu-se a norma NBR 7011,<sup>(13)</sup> empregando-se vinte e cinco corpos-de-prova para cada aço estudado<sup>(7)</sup>. Avaliações quantitativas e qualitativas desse teste foram feitas após 3 e 4 anos de exposição, respectivamente.

Na Tabela 1 é apresentada a taxa de corrosividade de cada um dos testes de corrosão realizados, em termos da perda de massa média de 5 corpos-de-prova de aço carbono para estampagem.

**Tabela 1.** Taxa de corrosividade dos testes acelerados e não-acelerados de corrosão.

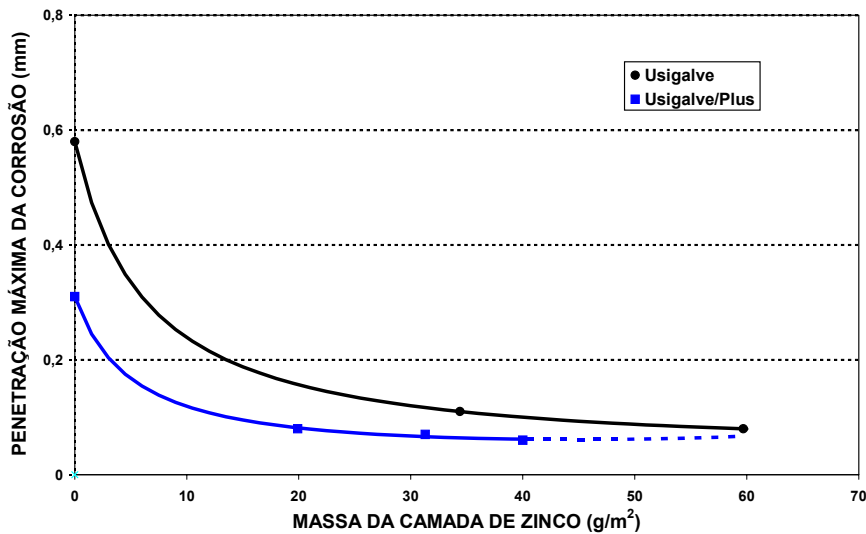
Tipo de Teste	Tipo de Solução Salina	Período de Superfície Úmida (%)	Taxa de Corrosão (kg Fe/m <sup>2</sup> .a)
Ciclado I	5% p/v NaCl	33	10,9
GM 9540P/B	0,9% p/v de NaCl + 0,1% p/v de CaCl <sub>2</sub> + 0,25% p/v de NaHCO <sub>3</sub>	37	12,0
Atmosfera industrial com aspersão salina	5% p/v NaCl	50	2,5
Atmosfera Marinha	não tem	50	1,7

Os resultados mostrados na Tabela 1 indicam que os testes acelerados cíclicos de corrosão foram os mais agressivos. Em seguida tem-se o teste acelerado de campo com aspersão de solução salina uma vez por semana, que é cerca de quatro vezes menos agressivo que os testes cíclicos de corrosão. O teste não-acelerado de corrosão com exposição em atmosfera marinha foi o menos agressivo dentre os testes realizados; no entanto, ele é considerado pela norma ISO 9223<sup>(14)</sup> como um teste severo, principalmente por ser de exposição ao intemperismo natural.

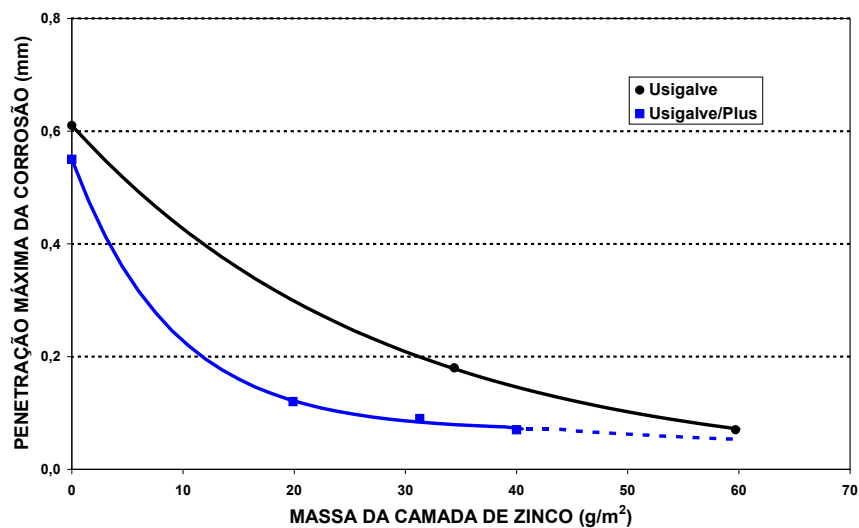
A resistência à corrosão dos corpos-de-prova foi avaliada determinando-se o avanço médio e a penetração máxima da corrosão, conforme norma NBR 8754<sup>(10)</sup>. No primeiro caso empregou-se técnica de análise de imagem, utilizando-se de câmara CCD (*couple charge device*) monocromática, placa para aquisição de imagem modelo PCI 1407, com software de aquisição e processamento desenvolvido pela Usiminas, fazendo-se o uso da linguagem de programação LabVIEW 6.1 da National Instrument. No segundo caso, a penetração máxima da corrosão foi determinada em 10 seções ao longo do risco e no sentido da espessura, utilizando-se técnica metalográfica e o analisador de imagens Quantimet 600 HR da Leica Cambridge Ltd.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras de 5 a 8 apresentam-se os resultados dos testes acelerados e não-acelerados de corrosão.

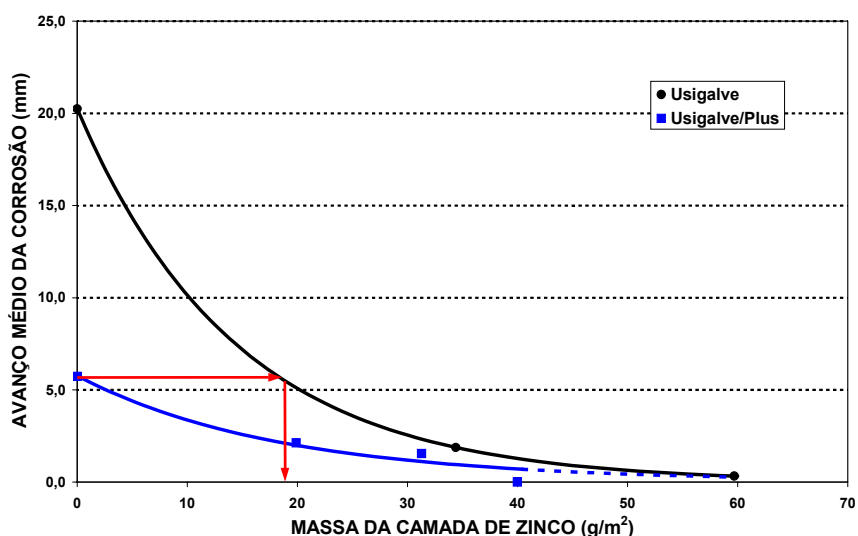


**Figura 5.** Resultado da penetração máxima da corrosão do teste acelerado cíclico de corrosão Ciclado I, após 1680h de exposição.

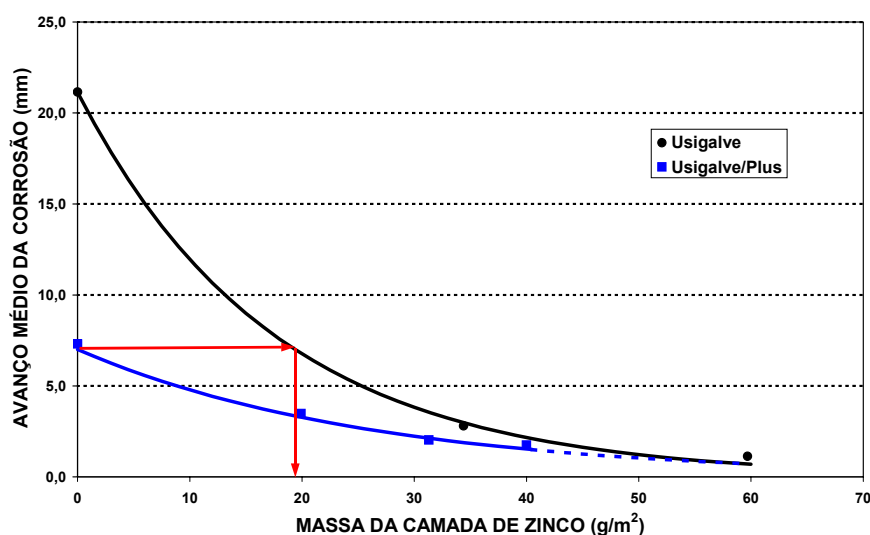


**Figura 6.** Resultado da penetração máxima da corrosão do teste acelerado cíclico de corrosão GM 9540P/B, após 1920h de exposição.

Conforme mostrado nas Figuras 5 e 6, o valor da penetração máxima da corrosão diminuiu à medida que a massa da camada de zinco dos aços aumentou. Constatase por essas Figuras que o desempenho do aço Usigalve/Plus foi melhor que o do aço Usigalve e isso é explicado pelo fato do substrato metálico do aço Usigalve/Plus ter características de resistência à corrosão atmosférica. Observa-se, ainda, que para massas de camadas de zinco acima de 60 g/m<sup>2</sup> o desempenho dos dois aços deverá ser praticamente igual, significando que a partir desse valor o mecanismo de corrosão predominante é o por barreira.<sup>(7)</sup>



**Figura 7.** Resultado do avanço médio da corrosão do teste de campo acelerado com aspersão de solução salina de NaCl a 5% p/v, uma vez por semana, após três anos de exposição.



**Figura 8.** Resultado do avanço médio da corrosão do teste não-acelerado de corrosão, após três anos de exposição em atmosfera marinha.

O avanço médio da corrosão também diminuiu com o aumento da massa da camada de zinco dos aços, Figuras 7 e 8. Nesse caso, verificou-se também que o desempenho do aço Usigalve/Plus foi melhor que o do aço Usigalve, mostrando que, além da massa de zinco, o substrato metálico também influencia no desempenho contra a corrosão dos aços.

Observa-se pelos resultados do avanço médio da corrosão que é perfeitamente possível reduzir a massa de zinco e manter ao mesmo tempo o desempenho contra à corrosão do material, simplesmente substituindo o substrato metálico. A partir dos dados empregados na elaboração da Figura 8, verifica-se que para obter um avanço médio da corrosão, por exemplo, de 1,5 mm são necessários 50 g/m<sup>2</sup> de zinco se o aço utilizado for o Usigalve (substrato de aço carbono para estampagem). Substituindo o material pelo aço Usigalve/Plus (substrato metálico com característica de resistência à corrosão atmosférica) a massa de zinco necessária passa a ser de 40 g/m<sup>2</sup>, correspondendo a uma redução de 20%. Com a redução da espessura da camada de zinco haveria um incremento na conformabilidade do material.

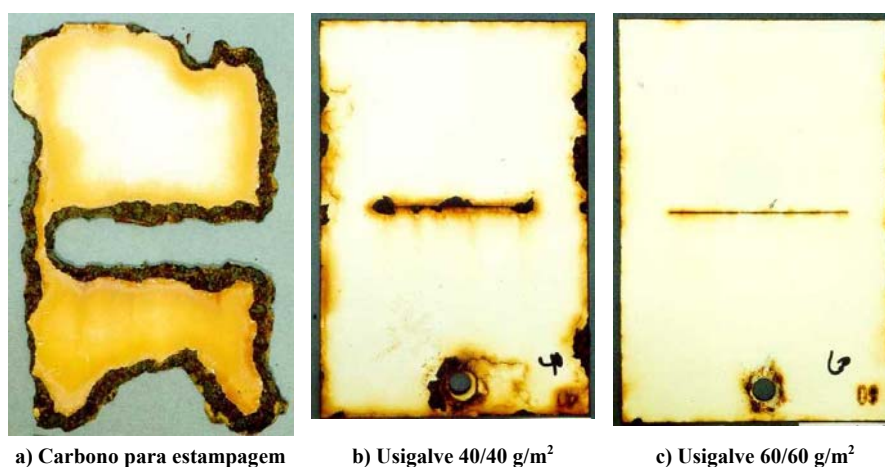
Outro aspecto importante mostrado nas Figuras 7 e 8 é em relação à massa mínima de camada de zinco. Observa-se nessas Figuras que abaixo de um determinado valor de massa de zinco, em torno de  $20 \text{ g/m}^2$ , é melhor utilizar o aço USI-R-COR-III sem revestimento de zinco do que o aço eletrolgalvanizado, pois o desempenho desse aço em relação à resistência à corrosão tornou-se inferior ao do USI-R-COR-III.

É possível encontrar na literatura<sup>(15,16)</sup> trabalhos que referenciam essa questão, segundo os quais os resultados de ensaios não-acelerados de corrosão, realizados com aços revestidos com zinco, ou com ligas a base de zinco, com massa de camada maiores do que  $30 \text{ g/m}^2$ , fosfatizados e pintados, foram satisfatórios quanto a proteção contra corrosão. Entretanto, com massa de zinco da ordem de  $20 \text{ g/m}^2$  a resistência à corrosão ficou seriamente prejudicada, independentemente do tipo de camada de zinco.

Para que a proteção por barreira oferecida pelo zinco seja efetiva, é necessário que haja uma camada de zinco entre o aço e o meio ambiente. Da mesma forma, para que a proteção catódica do zinco seja eficiente, é indispensável que os elétrons oriundos da dissolução do zinco — corrente anódica — sejam em número suficiente para contrabalançar os elétrons necessários para que o aço não sofra corrosão — corrente catódica.

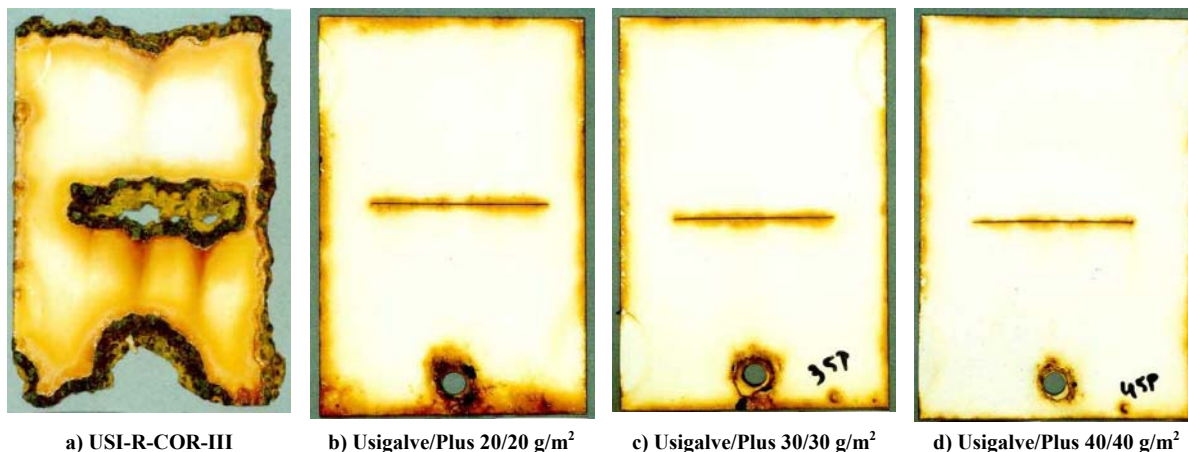
Assim, quando a massa da camada de zinco é muito baixa, os mecanismos de proteção por barreira e catódica não conseguem proteger o aço, deixando-o prematuramente exposto às condições ambientais. Se o substrato metálico for de aço carbono para estampagem, sem características de resistência à corrosão, o processo corrosivo se desenvolve sem dificuldade, formando óxidos volumosos e pouco aderentes. Com o tempo ocorrerá a perfuração do material, pois a quantidade de zinco disponível também não é suficiente para proteger catodicamente o aço nas regiões danificadas da película de tinta.

A aparência típica dos corpos-de-prova após 4 anos de teste não-acelerado de corrosão, com exposição em atmosfera marinha, pode ser vista nas Figuras 9 e 10. Por essas Figuras constata-se, além da influência da massa da camada de zinco na resistência à corrosão dos aços eletrolgalvanizados, o melhor desempenho dos aços com substrato de aço USI-R-COR-III comparativamente aos de aço carbono para estampagem, principalmente nas regiões de risco, bordas e furação.



**Figura 9.** Aspecto dos corpos-de-prova com substrato metálico de aço carbono para estampagem, após 4 anos de teste não-acelerado de corrosão com exposição em atmosfera marinha.





**Figura 10.** Aspecto dos corpos-de-prova com substrato metálico de aço USI-R-COR-III, após 4 anos de teste não-acelerado de corrosão com exposição em atmosfera marinha.

#### 4 CONCLUSÕES

Do estudo concluiu-se que a massa da camada de zinco exerce papel preponderante na resistência à corrosão dos aços eletrolgalvanizados, fosfatizados e pintados.

A utilização de substratos metálicos com características de resistência à corrosão também contribuiu para o aumento da resistência à corrosão atmosférica dos aços eletrolgalvanizados.

A redução pura e simples da massa da camada de zinco não é uma boa opção, pois dependendo da quantidade de zinco escolhida, o desempenho quanto a resistência à corrosão dos aços revestidos com zinco é inferior ao dos aços com características de resistência à corrosão atmosférica e sem esse revestimento.

O aumento da resistência à corrosão proporcionado pelo substrato metálico dos aços Usigalve/Plus (aço USI-R-COR-III) permite reduzir a massa de zinco desses aços até que sua resistência à corrosão iguale à dos aços Usigalve de maior massa de zinco e fabricados com substrato de aço carbono para estampagem. A produção de aços Usigalve/Plus com menor espessura de camada de zinco proporcionaria um incremento na conformabilidade dos aços eletrolgalvanizados.

Para esquemas de pintura semelhantes ao utilizado nesse estudo pode-se empregar as curvas apresentadas nas Figuras 7 e 8 como referência de cálculo da espessura da camada de zinco, caso contrário é necessário a construção de tais curvas.

## REFERÊNCIAS

- 1 VANWESEMAEL, J. DIE-CASTING ENGINEER, pp. 26 march/2003.
- 2 HISAMOTO, J.; IKEDA, K.; SATOH, H. Aspects of Peeling behavior of electrogalvanized Steel Sheets with Emphasis on Coating Hardness. KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW, n. 11, pp. 33-37, Jun./1991.
- 3 URAI, M.; IWAYA, J.; ARIMURA, M.; SAKAI, H.; MIYAHARA, M. Effects of Forming Conditions on Exfoliation of Galvanneal Steel Sheets. KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW, n. 11, pp. 38-42, June/1991.
- 4 CÁRCEL, A. C.; FERRER-GIMÉNEZ, C.; GONZALO, G. Determinación Experimental de los Factores que Controlan el Desprendimiento de Polvos en el Conformado de Chapas de Acero Recubiertas con Zn-Ni. REV. METAL. MADRID, vol. 31, n. 2, pp. 79-88, 1995.
- 5 PEREIRA, J. F. B.; ALVARENGA, E. A.; BARCELOS, H. Influência de Revestimentos Metálicos no Valor "R" de Lankford de Aços Laminados à Frio. In: XXXII SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS, PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS DA ABM, pp. 443-448. Curitiba, nov./1995.
- 6 KIKUCHI, K.; ISOBE, M.; KATO, C.; UCHIDA, M. Corrosion of the Vehicles used in North America: Anti-corrosion Performance of Galvanized Steel Sheet in Several Parts of Vehicle. JSAE - SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN, pp. 205-210, 2001.
- 7 ALVARENGA, E. A.; BUONO, V. T. L. Influência do Substrato Metálico na Resistência à Corrosão de Aços Eletro galvanizados Fosfatizados e Pintados. In: 60° Congresso Anual da ABM – Belo Horizonte, MG, 25 a 28 de Julho de 2005.
- 8 NBR 10443 - Tintas - Determinação da Espessura da Película Seca - Método de Ensaio. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, agosto/1988.
- 9 NBR 11003 - Tintas - Determinação da Aderência. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, abril/1990.
- 10 NBR 8754 - Corpos-de-prova Revestidos e Expostos a Ambientes Corrosivo - Método de Avaliação. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, fevereiro/1985.
- 11 GM 9540P/B - Accelerated Corrosion Test. GENERAL MOTORS ENGINEERING STANDARDS - MATERIALS AND PROCESS - PROCEDURES, December/1997.
- 12 ISO 11474 - Corrosion of metals and Alloys - Corrosion Tests in Artificial Atmosphere - Accelerated Outdoor Test by Intermittent Spraying of Salt Solution. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1993.
- 13 NBR 7011 - Materiais Metálicos Revestidos por Pintura - Ensaio Não-acelerado de Corrosão - Método de Ensaio. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, dezembro/1981.
- 14 ISO - 9223 - Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 1992.
- 15 YASUDA, A.; UMINO, S.; KYONO, K; YAMATO, K. Cosmetic Corrosion of Zn Alloy Coated Sheet Steels. In: WORLD MATERIALS CONGRESS - CORROSION RESISTANT AUTOMOTIVE SHEET STEELS, pp. 31-37. Chicago, 1988.
- 16 MIYOSHI, Y.; OKA, J.; MAEDA, S. Fundamental Research on Corrosion Resistance of Precoated Steel Sheets for Automobiles. TRANSACTION ISIJ, vol. 23, pp. 974-983, 1983.