

# INFLUÊNCIA DO SUBSTRATO METÁLICO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS ELETROGALVANIZADOS FOSFATIZADOS E PINTADOS<sup>(1)</sup>

*Evandro de Azevedo Alvarenga<sup>(2)</sup>  
Vicente Tadeu Lopes Buono<sup>(3)</sup>*

## **Resumo**

Neste trabalho avaliou-se a influência do substrato metálico na resistência à corrosão dos aços eletrogalvanizados, fosfatizados e pintados. Para tanto, utilizou-se dois tipos de aços eletrogalvanizados: um com substrato metálico de aço carbono comum, denominado Usigalve, e outro com substrato de aço USI-R-COR-III, com característica de resistência à corrosão, designado Usigalve/Plus. A resistência à corrosão foi avaliada por meio de teste de campo acelerado com aspersão de solução salina e não-acelerado de corrosão, utilizando-se as estações de corrosão atmosférica industrial e marinha da Usiminas. O parâmetro medido foi o avanço médio da corrosão, empregando-se técnicas de análise de imagem. O estudo mostrou de forma muito evidente que, mesmo com 50% de massa de zinco menor, o aço Usigalve/Plus apresentou melhor resistência à corrosão que o aço Usigalve.

**Palavras-chave:** Resistência à corrosão, Eletrogalvanização, Fosfatização, Pintura.

---

(1) *Contribuição Técnica ao 60º Congresso Anual da ABM – Belo Horizonte, MG, 25 a 28 de Julho de 2005.*

(2) *Membro da ABM; Engenheiro Químico, M.Sc., Gerência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG*

(3) *Membro da ABM; Físico, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, MG.*

# 1 INTRODUÇÃO

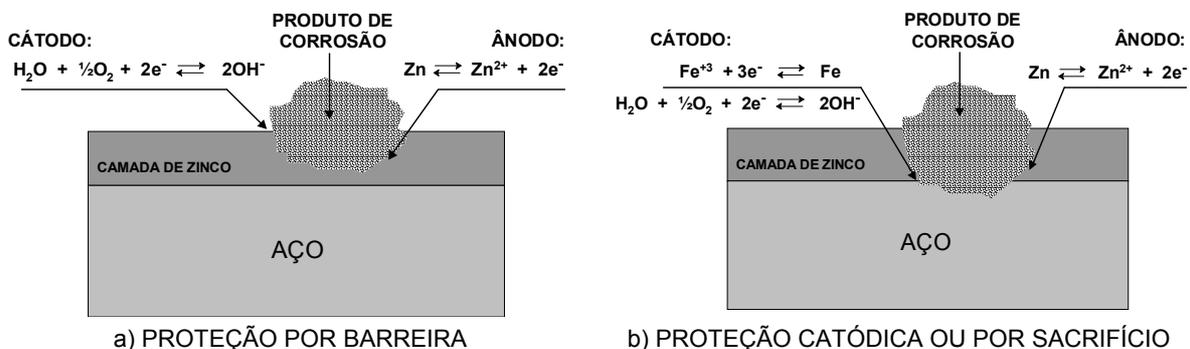
As indústrias, de um modo geral, optam por utilizar aços revestidos em seus produtos para prevenirem eventuais problemas de corrosão. Os aços mais utilizados para essa finalidade são os revestidos com zinco, seja por um processo eletrolítico ou por imersão a quente.

No presente estudo foram avaliados o desempenho contra a corrosão atmosférica de dois tipos de aços eletrolgalvanizados produzidos pela Usiminas: os aços Usigalve e Usigalve/Plus.

O aço Usigalve é um produto laminado a frio, revestido eletroliticamente com zinco, tendo como substrato metálico o aço carbono, que apresenta propriedades mecânicas de acordo com as solicitadas pelo usuário. O processo de eletrodeposição desse aço foi desenvolvido pela empresa austríaca Andritz/Ruthner-Division e utiliza células eletrolíticas do tipo GRAVITEL<sup>(1)</sup>. Os aços Usigalve/Plus são, também, aços eletrolgalvanizados via processo GRAVITEL tendo, entretanto, como substrato metálico o aço USI-R-COR-III, com características de resistência à corrosão atmosférica, além de propriedades mecânicas adequadas à sua aplicação.

Os aços da série Usigalve podem ser aplicados em todos aqueles segmentos industriais que utilizam normalmente aços laminados a frio, como por exemplo, a indústria automobilística, a de autopeças, a de carrocerias metálicas, a de eletrodomésticos, a de equipamentos eletroeletrônicos, a de móveis de aços, a da construção civil, a de embalagens.

O zinco protege o aço contra corrosão por dois mecanismos: por barreira e por proteção catódica (ânodo de sacrifício), Figura 1.



**Figura 1.** Representação esquemática da proteção contra corrosão oferecida pelos revestimentos à base de zinco.

Conforme mostra a Figura 1a, não havendo exposição do aço, o mecanismo de proteção por barreira da camada de zinco é o mais importante. Por outro lado, estando a camada de zinco danificada e o substrato metálico exposto, o mecanismo de proteção galvânica torna-se, também, importante, Figura 1b. Em ambos os casos, a massa da camada de zinco exerce papel preponderante no mecanismo de proteção contra a corrosão dos aços. No primeiro caso, devido à própria natureza do processo corrosivo, quanto maior for a espessura da camada de zinco maior será a barreira de proteção contra corrosão. No segundo caso, quanto maior for a massa

de zinco, maior será sua disponibilidade para oxidar no lugar do substrato metálico, devido ao mecanismo de proteção catódica.

Após a perda da proteção contra corrosão oferecida pela camada de zinco, inicia-se o processo corrosivo do aço. A partir dessa situação, a durabilidade do material, ou seja, sua taxa de corrosão, dependerá do tipo de aço utilizado e do meio ambiente. Assim, a solução para prolongar ainda mais a vida útil dos produtos é a utilização de substratos metálicos mais resistentes à corrosão atmosférica que os aços carbono comuns, como é o caso do aço USI-R-COR-III.

O estudo do mecanismo da corrosão dos aços da série USI-R-COR por meio de técnicas eletroquímicas de polarização anódica potenciodinâmicas mostrou que a adição de cobre aos aços efervescentes ou acalmados ao alumínio proporciona uma sensível diminuição no valor da densidade de corrente crítica ( $i_{cr}$ ), demonstrando assim a menor tendência desses aços em sofrer dissolução anódica (corrosão)<sup>(2)</sup>. Além disso, foi também verificado que o valor da densidade de corrente de redução dos íons hidrogênio ( $i_{H^+}$ ) aumenta a partir de teores residuais de cobre até teores da ordem de 0,10%. Isso significa que a adição de cobre favorece a reação de redução de íons hidrogênio, beneficiando o processo de fosfatização do aço. Como consequência, a camada de fosfato dos aços da série USI-R-COR apresenta menor porosidade, comparativamente à dos aços carbono comuns.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

Os 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 comum, USI-R-COR-III, Usigalve e Usigalve/Plus.

A fosfatização e a pintura foram feitas em uma empresa automobilística. Os corpos-de-prova foram desengraxados com uma solução alcalina e fosfatizados com um fosfato tricatiônico. Quanto à pintura, inicialmente receberam pintura do tipo cataforética, utilizando uma massa catiônica. Em seguida, foi aplicada automaticamente, com retoque manual, uma demão de tinta intermediária (*primer surfacer*) cor cinza. Finalmente os corpos-de-prova receberam pintura de acabamento com esmalte sintético acrílico de cor branca, realizada por processo robotizado utilizando pistola convencional. As curas das tintas cataforética, intermediária e de acabamento foram feitas em estufa com circulação de ar quente a uma temperatura entre 180 °C e 190 °C, durante 40 minutos a 50 minutos.

O carbono e o enxofre presentes no substrato metálico foram determinados por combustão com detecção por infravermelho e os demais elementos químicos por espectrometria de plasma. A massa e a composição química das camadas de fosfato e de zinco foram determinadas removendo-se essas camadas de cinco corpos-de-prova e analisando-se a solução de remoção por espectrometria de plasma. A solução utilizada na remoção da camada de zinco foi de HCl 1:1 v/v. Para a remoção da camada de fosfato utilizou-se uma solução de CrO<sub>3</sub> 0,5% p/v, a 70 °C.

A espessura da película seca de tinta foi determinada em cinco corpos-de-prova de cada aço estudado utilizando o medidor de espessura por indução magnética da Fischer, modelo Fischerscope MMS (Multi Measuring System), de acordo com a norma NBR 10443<sup>(3)</sup>. A aderência dessa película foi medida tanto pelo método da grade, conforme norma NBR 11003<sup>(4)</sup>, como pelo método da tração.

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>(5)</sup>.

O teste de campo acelerado com aspersão de solução salina foi realizado de acordo com a norma ISO 11474<sup>(6)</sup>. Dez corpos-de-prova de cada aço foram expostos na miniestação de corrosão localizada dentro e no mesmo nível da planta industrial da Usiminas (247 m), na latitude 19°29'09"S e longitude 42°32'01"O, em Ipatinga-MG. Os corpos-de-prova receberam aspersão de solução de NaCl a 5% p/v uma vez por semana, durante três anos. O período de superfície úmida do teste foi de 50% e a taxa de corrosividade dessa estação encontra-se na Tabela 1.

**Tabela 1.** Taxa de corrosão de diferentes tipos de materiais expostos nas estações para estudos sobre corrosão da Usiminas.

Tipo de aço	Taxa de corrosão [g/(m <sup>2</sup> .a)] e categoria da corrosividade da atmosfera <sup>(a)</sup>		
	Miniestação	Atmosfera industrial	Atmosfera marinha
Carbono comum	385,6 C3	327,7 C3	1533,5 > C5
USI-R-COR-III	294,0 C3	288,4 C3	608,5 C4
Alumínio	0,4 C2	0,3 C2	2,5 C4
Cobre	26,7 C5	15,9 C4	52,8 C5
Zinco	13,19 C3	8,6 C3	35,7 C5

OBS.: a - De acordo com a norma ISO 9223<sup>(7)</sup>. Categoria da corrosividade da atmosfera: C1 = muito baixa; C2 = baixa; C3 = média; C4 = alta; C5 = muito alta.

O teste não-acelerado de corrosão foi executado de acordo com a norma NBR 7011<sup>(8)</sup>, empregando-se vinte e cinco corpos-de-prova para cada aço estudado. Para a realização desse teste utilizou-se as estações para estudos sobre corrosão atmosférica da Usiminas. A estação de corrosão atmosférica industrial fica dentro da área interna da Usiminas, em Ipatinga-MG, na latitude 19°29'38"S, longitude 42°33'12"O e a 47 m acima do nível da planta industrial. A estação de corrosão atmosférica marinha está localizada na latitude 23°00'49"S e longitude 42°00'56"O, a 48,7 m de altitude em uma área mais alta da ilha de Cabo Frio, em Arraial do Cabo-RJ. O período de superfície úmida desses testes também foi de 50%. A Figura 2 mostra uma vista geral dessas estações e a Tabela 1 a taxa de corrosividade.

A resistência à corrosão dos corpos-de-prova foi avaliada determinando-se o avanço médio da corrosão, conforme norma NBR 8754<sup>(5)</sup>. Para isso 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 uso da linguagem de programação LabVIEW 6.1 da National Instrument.



a) Atmosfera industrial



b) Atmosfera marinha

**Figura 2.** Estações de corrosão atmosférica da Usiminas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização dos Materiais

A Tabela 2 mostra que os substratos metálicos dos aços Usigalve (carbono comum) e Usigalve/Plus (USI-R-COR-III) são muito semelhantes, diferenciando apenas quanto aos teores de níquel, cobre e cromo, que são maiores nos aços Usigalve/Plus. Quanto às propriedades mecânicas desses aços, a Tabela 3 mostra que elas são praticamente iguais.

**Tabela 2.** Composição química típica dos aços utilizados no estudo.

Tipo de aço	Composição química do aço (%p/p)						
	C	S	Mn	P	Si	Al	Ni + Cu +Cr
Carbono comum	0,046	0,013	0,25	0,015	0,012	0,040	0,024~0,033
USI-R-COR-III	0,050	0,012	0,25	0,015	0,007	0,036	0,170~0,175

**Tabela 3.** Propriedades mecânicas típicas dos aços carbono comum e USI-R-COR-III.

Tipo de aço	Propriedades mecânicas				
	Limite		Alongamen- to (BM=50mm) (%)	Dobramen- to	Dureza Rockwell (HR <sub>B</sub> )
	Escoamento (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência (N/mm <sup>2</sup> )			
Carbono comum	182	312	41	0 E	41
USI-R-COR-III	190	330	41	0 E	42

As massas das camadas de zinco mostradas na Tabela 4 estão de acordo com aquelas programadas para este estudo. Quanto à composição química, observou-se que os teores de ferro (0,4% p/p a 0,8% p/p), alumínio (< 0,05% p/p) e silício (< 0,05% p/p) estão dentro das faixas previstas para os aços da série Usigalve. A morfologia da camada de zinco era típica dos aços eletrolgalvanizados, com cristais

de zinco hexagonais, distribuídos aleatoriamente e com orientação cristalográfica piramidal de baixo ângulo.

**Tabela 4.** Resultados das determinações das massas das camadas de zinco e de fosfato e da espessura e aderência da película seca de tinta.

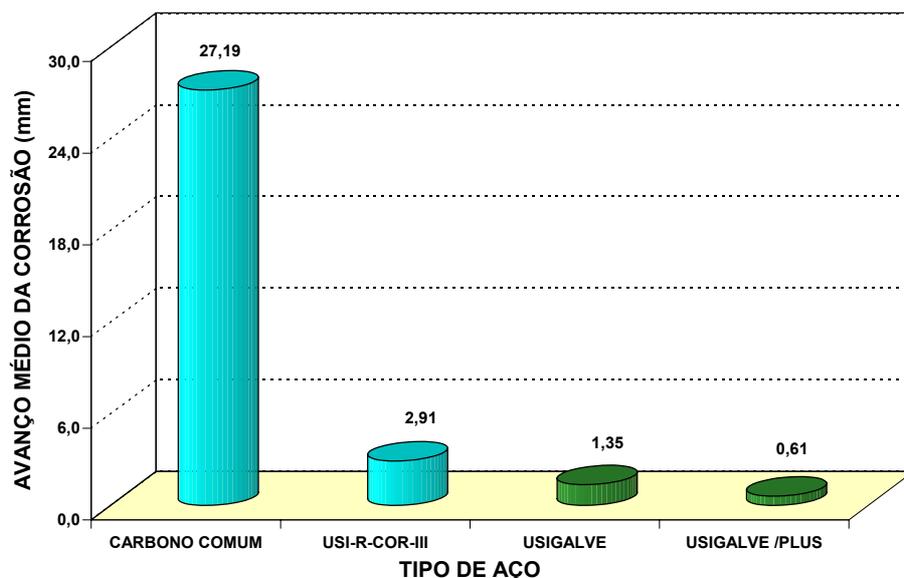
Tipo de aço	Massa de zinco (g/m <sup>2</sup> )	Massa de fosfato (g/m <sup>2</sup> )	Película de tinta		
			Espessura média (μm)	Aderência	
				Grade	Tração (MPa)
Carbono comum	não tem	3,41	110	grau 0	1,70
USI-R-COR-III	não tem	3,19	106	grau 0	1,80
Usigalve	59,7	4,24	113	grau 0	2,72
Usigalve/Plus	40,0	3,82	112	grau 0	1,54

A camada de fosfato dos aços não-revestidos apresentou massa variando de 3,19 g/m<sup>2</sup> a 3,41 g/m<sup>2</sup> e a dos revestidos de 3,82 g/m<sup>2</sup> a 4,24 g/m<sup>2</sup>, Tabela 4. Essa variação está perfeitamente dentro do esperado para cada classe de aço estudado, principalmente tratando-se de um processo industrial. O teor de manganês da camada de fosfato variou de 4,9% p/p a 5,5% p/p e o de níquel de 0,6% p/p a 0,9% p/p, também normais para os fosfatos tricatiônicos. A análise da morfologia dos cristais de fosfato mostrou que no caso dos aços não-revestidos seus cristais eram uniformes, cristalinos e apresentavam a forma de um paralelepípedo e nenhuma porosidade aparente foi observada. As principais fases encontradas foram a hopeíta [Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O] e a fosfofilita [Zn<sub>2</sub>Fe(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O]. No caso dos aços revestidos, os cristais de fosfato também eram uniformes, cristalinos e a sua forma variava entre a de uma agulha e a de uma pétala. Não foi detectada nenhuma porosidade na camada de fosfato e a principal fase encontrada foi a hopeíta.

A espessura média da película seca de tinta foi em torno de 110 μm, com desvio padrão de 3 μm, Tabela 4. A película seca de tinta não apresentou destacamento no teste de aderência pelo método da grade. No teste de aderência por tração, os valores de aderência foram considerados adequados para os ensaios de corrosão.

### 3.2 Teste de Campo Acelerado com Aspersão de Solução Salina

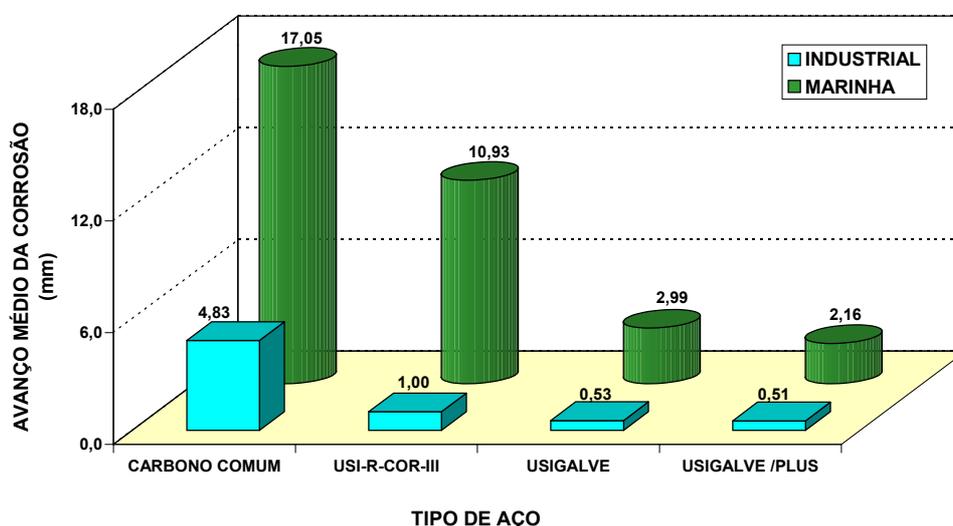
Pela Figura 3 conclui-se que os corpos-de-prova de aço USI-R-COR-III apresentaram os melhores resultados de resistência à corrosão. No caso dos aços não-revestidos, o avanço médio da corrosão do aço USI-R-COR-III foi cerca de 9 vezes menor que o do aço carbono comum. Quanto aos aços eletrolgalvanizados, o avanço médio da corrosão do aço Usigalve/Plus foi 2,2 vezes menor que o valor obtido para o aço Usigalve. Destaca-se que a massa da camada de zinco do aço Usigalve é 50% maior que a do aço Usigalve/Plus.



**Figura 3.** Resultados do teste de campo acelerado com aspersão de solução salina de NaCl a 5% p/v, após três anos de exposição.

### 3.3 Teste Não-acelerado de Corrosão com Exposição em Atmosferas Industrial e Marinha

A Figura 4 apresenta os resultados do avanço médio da corrosão obtidos nos testes não-acelerados de corrosão, após três anos de exposição em atmosferas industrial e marinha.



**Figura 4.** Resultados do avanço médio da corrosão dos testes não-acelerados de corrosão, após três anos de exposição em atmosferas industrial e marinha.

De acordo com a Figura 4, os corpos-de-prova em aço carbono comum apresentaram maior avanço médio da corrosão que os em aço USI-R-COR-III, independentemente se eram ou não-revestidos com zinco e do local de exposição. O aço carbono comum, comparativamente ao aço USI-R-COR-III, apresentou 383%

e 56% mais avanço médio da corrosão em atmosferas industrial e marinha, respectivamente. Quando na condição eletrolítico, o avanço médio da corrosão do aço Usigalve/Plus foi, em atmosferas industrial e marinha, 3,8% e 27,8%, respectivamente, menor em relação ao aço Usigalve, apesar de ter menor massa de camada de zinco.

#### **4 CONCLUSÕES**

Do estudo conclui-se que, além da massa da camada de zinco, o substrato metálico também pode contribuir para melhorar a resistência à corrosão atmosférica dos aços eletrolíticos. Para isso basta utilizar um substrato metálico com propriedades de resistência à corrosão, como é o caso do aço USI-R-COR-III.

O benefício da utilização de aços com resistência à corrosão atmosférica é ainda maior quando se considera que massas menores de camada de zinco podem ser empregadas, melhorando conseqüentemente o desempenho do material nos processos de conformação e de soldagem; mantendo, ainda, os mesmos resultados de resistência à corrosão obtidos pelos aços eletrolíticos convencionais de mesma classe.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 ALVARENGA, E. A.; SOUSA, J. G.; OLIVEIRA, G. A.; MACHADO, G. O. - Implantação da Linha de Galvanização Eletrolítica da Usiminas. CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA N. 2359 ESPECIAL PARA A REVISTA METALURGIA & MATERIAIS. São Paulo, jan./1994.
- 2 MIRANDA, F. J. F.; SOUSA, J. G.; PINTO, J. A. - Mecanismo da Ação do Cobre na Melhoria da Resistência à Corrosão de Chapas de Aço Revestidas. In: XXXIX CONGRESSO ANUAL DA ABM. Belo Horizonte, Jul./1984.
- 3 NBR 10443 - Tintas - Determinação da Espessura da Película Seca - Método de Ensaio. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, agosto/1988.
- 4 NBR 11003 - Tintas - Determinação da Aderência. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, abril/1990.
- 5 NORMA NBR 8754 - Corpos-de-prova Revestidos e Expostos a Ambientes Corrosivo - Método de Avaliação. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, fevereiro/1985.
- 6 ISO 11474 - Corrosion of metals and Alloys - Corrosion Tests in Artificial Atmosphere - Accelerated Outdoor Test by Intermittent Spraying of Salt Solution. ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1993.
- 7 NORMA ISO 9223:1992 (E) - Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification. ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 1992.
- 8 NBR 7011 - Materiais Metálicos Revestidos por Pintura - Ensaio Não-acelerado de Corrosão - Método de Ensaio. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, dezembro/1981.

# INFLUENCE OF THE METALLIC SUBSTRATE ON THE CORROSION RESISTANCE OF PHOSPHATIZED AND PAINTED ELECTROGALVANIZED STEELS <sup>(1)</sup>

Evandro de Azevedo Alvarenga <sup>(2)</sup>  
Vicente Tadeu Lopes Bueno <sup>(3)</sup>

## Abstract

The influence of the metallic substrate on the atmospheric corrosion resistance of phosphatized and painted electrogalvanized steel sheets was investigated. Two types of electrogalvanized steels were evaluated: one with common carbon steel as metallic substrate, called Usigalve, and the other, called 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 field tests with aspersion of saline solution and non-accelerated corrosion tests in industrial and marine atmospheric corrosion stations of Usiminas. Measurement at scribe creepback was done by image analysis. This study showed a strong influence of the metallic substrate (USI-R-COR-III versus common carbon steels) on the atmospheric corrosion resistance of phosphated and painted electrogalvanized steel sheets.

**Key-words:** Corrosion resistance, Electrogalvanizing, Phosphatization, Painting.

---

(1) *Technical Contribution to the 60<sup>th</sup> Annual Congress of the Brazilian Association of Metallurgy and Materials – Belo Horizonte, MG, Brazil, July/25-28/2005.*

(2) *ABM Member; Chemical Engineer, M. Sc., CQE/ASQ; Research and Development Center of Usiminas, Ipatinga, MG, Brazil.*

(3) *ABM Member; Physics, Dr., Department of Metallurgical and Materials Engineering of Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil.*