

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 da corrosão atmosférica em perfis que compõem a estrutura galvanizada de sustentação de cabos de transmissão de energia elétrica

J. A. Moreto¹, D. B. V. Castro¹, L. S. Rossino², O. Maluf², D. Spinelli³, J. R. Tarpani³

Abstract

It is well-known that the phenomenon of corrosion is responsible for the consumption of about 20% of world production of iron and steel. In an attempt to reduce this alarming rate, technological efforts are performed to preserve these metals from electro-chemical degradation. The objective of this study was to investigate the root causes of atmospheric corrosion suffered by galvanized steel support structure for electric power transmission cables in a gas extraction plant. Through visual analysis of samples collected at the plant site, it was found that significant percentage of the supporting steel sections have developed critical corrosion. Chemical analysis, Zinc weight-loss tests, and scanning electron microscopy were performed to characterize the microstructure, morphology, integrity level and the adhesion of Zn layer to the substrate. It was found that the corrosion degrading of zinc coatings was basically due to H_2SO_4 and H_2SO_3 attack, which were generated by high local availability of rain water along with SO_2 released in the nearby Ni ore reduction plant. Other corrosion mechanisms have also occurred locally in the galvanized structure.

Keywords: corrosion, electroplating, zinc plating, transmission cables, gas extraction plant.

Resumo

É sabido que o fenômeno de corrosão é responsável pelo consumo de aproximadamente 20% da produção mundial de ferro e aço. Na tentativa de reduzir este índice tão alarmante, esforços tecnológicos são realizados visando à proteção desses metais. O objetivo deste trabalho foi o de investigar as possíveis causas da corrosão atmosférica sofrida por perfis que compõem a estrutura galvanizada de sustentação de cabos de transmissão de energia elétrica de uma planta de uma empresa especializada na extração de gases industriais. Verificou-se, por intermédio da análise visual das amostras coletadas na planta local, que uma expressiva porcentagem desses perfis desenvolveu um quadro crítico de corrosão. Análise química, ensaios de perda de massa de Zn e inspeções via microscopia eletrônica de varredura foram realizadas em amostras retiradas dos perfis, para a caracterização da microestrutura, morfologia, integridade e adesão ao substrato. Verificou-se que a corrosão experimentada pelos recobrimentos de Zn das estruturas metálicas de sustentação do sistema de cabos elétricos ocorreu basicamente por ataque de H_2SO_4 e H_2SO_3 , gerados pela grande disponibilidade local de água da chuva e SO_2 liberado no processo de redução do minério de

¹ Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais – SMM/EESC/USP.

² Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais – SMM/EESC/USP.

³ Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística (SMM) da Escola de Engenharia (EESC) de São Carlos/USP.

Ni em uma mina localizada proximamente. Outros mecanismos de corrosão também se estabeleceram localmente na estrutura galvanizada.

Palavras-chave: corrosão, galvanização, zincagem, cabos de transmissão, planta de extração de gases.

Introdução

Num aspecto muito difundido e aceito universalmente, define-se corrosão como a interação química ou eletroquímica de um material, geralmente metálico, com o meio ambiente, aliado ou não a esforços mecânicos. A corrosão, em geral um processo espontâneo, está constantemente transformando os metais de modo que sua durabilidade e desempenho deixam de satisfazer os fins que se destinam. Não se pode mais esperar que a corrosão surja para depois se providenciar uma solução, mas sim enfrentá-la como um fato que pode vir a ocorrer e, portanto, evitá-la já na elaboração do projeto ⁽¹⁾.

A resistência de um metal contra a corrosão é tanto maior quanto maior for a sua nobreza, a qual é quantificada por meio do potencial de eletrodo, em volts (E^0). O fenômeno da corrosão preferencial de um metal em relação ao outro é explicado pelas suas posições relativas na escala da tabela de potenciais padrões de redução ⁽²⁾. Em outras palavras, os metais mais redutores são corroídos no lugar dos menos redutores. Como o zinco, Zn, é mais anódico do que o elemento ferro, Fe, o primeiro é corroído preferencialmente quando estes metais são acoplados em um meio agressivo, ou seja, o Zn se sacrifica para proteger o Fe. Este tipo de proteção também é conhecido como proteção catódica.

O processo de zincagem por imersão a quente consiste na imersão da peça no Zn fundido, a uma temperatura de 445 a 460°C. O aço e o Zn reagem formando um revestimento de proteção, que consiste de uma camada externa só de Zn e outras camadas internas intermetálicas. A durabilidade do revestimento obtido por zincagem por imersão a quente está relacionada com a espessura da camada de Zn. A presença e morfologia da camada de Zn puro dependem de alguns fatores de fácil controle, tais como: tempo de imersão, velocidade de imersão e estado superficial do metal-base ⁽¹⁾.

A galvanização eletrolítica nada mais é do que a deposição do Zn em um material através de corrente elétrica. Devido à alta corrente aplicada, em torno de 2000 A, este Zn é depositado na superfície e ali permanecerá mesmo sob certas dobras e torções aplicadas ao material. Este processo garante excepcional aumento na durabilidade do material ⁽³⁾.

O objetivo deste trabalho foi investigar possíveis causas da corrosão atmosférica sofrida por perfis que compõem a estrutura galvanizada de sustentação de cabos de transmissão de energia elétrica, de uma planta de uma empresa especializada na extração de gases industriais.

Metodologia

Foi realizada uma inspeção visual *in loco* da planta, para que observação dos perfis que compõem a estrutura de sustentação de cabos de transmissão de energia elétrica. Vários registros fotográficos foram efetuados, com o intuito de evidenciar os possíveis sinais de corrosão pontuais.

Na caracterização dos recobrimentos de Zn, depositados eletroliticamente e por imersão a quente, e de seus respectivos substratos de aço, foram realizados alguns ensaios e análises, que serão descritos a seguir.

Ensaio de perda de massa foram realizados segundo a norma ASTM A90/A90M. Na impossibilidade da utilização de amostras contínuas com as dimensões mínimas exigidas, em virtude da existência de furação nos perfis, foram obtidas amostras de geometria quadrada com máxima dimensão possível de aresta, em torno de 25,00 mm. A espessura de parede dos perfis principais da estrutura eletrogalvanizada era tipicamente de 2,10 mm e a dos perfis galvanizados por imersão a quente, 2,22 mm. Os perfis montantes de suporte da estrutura eletrogalvanizada apresentaram espessura de parede de 1,57 mm. Os ensaios de perda de massa dos recobrimentos de Zn objetivaram a determinação da espessura das camadas protetoras.

Foi realizada análise química composicional dos substratos (metal-base), de modo a se confirmar, ou não, a hipótese de se tratarem de simples aços-carbono. O equipamento utilizado para esta análise foi um espectrômetro de emissão óptica por centelha (ARL 3460). A temperatura de análise foi de 26°C com grau de umidade relativa do ar de 43%.

Utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura Zeiss DMS 960, foi efetuada uma inspeção detalhada das camadas de Zn depositadas, dos substratos de aço e das interfaces formadas. A microscopia eletrônica de varredura das camadas de Zn foi realizada para a comprovação dos resultados de dimensionamento das camadas via perda de massa, bem como a caracterização da sua microestrutura, morfologia, integridade e adesão ao substrato. Em adição, os substratos de aço foram caracterizados quanto a sua granulometria e as juntas soldadas inspecionadas quanto à presença de descontinuidades geométricas significativas que favorecessem determinados processos corrosivos.

Resultados e Discussões

Verificou-se por intermédio da análise visual, que uma expressiva porcentagem dos perfis da estrutura galvanizada de sustentação do sistema elétrico desenvolveu um quadro crítico de corrosão, enquanto que a parcela restante dos perfis permaneceu intacta. Foi relatado que os perfis corroídos haviam sido galvanizados por processo eletroquímico (deposição de Zn na chapa de aço por processo eletrolítico), enquanto que os não atacados foram galvanizados pelo processo de imersão a quente (*hot dip*). Além disto, foi enfatizado que os perfis íntegros eram acoplados uns aos outros por um processo simples de encaixe e dobramento, utilizando-se montantes intermediários, enquanto que os perfis da estrutura eletrogalvanizada haviam sido soldados entre si, também se utilizando montantes de união. Foi também destacado que, como decorrência do próprio processo de redução do minério de níquel, há uma expressiva liberação de dióxido de enxofre, SO₂, para o ambiente.

A Figura 1(a) apresenta uma vista parcial da planta de produção de gases industriais, onde se observa que se encontra a céu aberto, não dispondo, portanto, de cobertura que permita a efetiva proteção das estruturas metálicas contra intempéries. Nestas condições, pode-se prever que tanto o ácido sulfúrico (H₂SO₄), quanto o ácido sulfuroso (H₂SO₃), gerados pela água da chuva e associados à grande disponibilidade de SO₂ no local, entram diretamente em contato com as estruturas galvanizadas, acarretando em um ambiente extremamente corrosivo para o aço em questão.

O SO_2 é um dos mais nocivos contaminantes atmosféricos industriais, tendo papel fundamental na corrosão do Zn e dos aços comuns. A concentração de SO_2 no meio é determinante, sendo que o gás apresenta um excepcional raio de alcance, a partir da sua fonte. No caso em questão, o enxofre, S, está presente no próprio mineral de millerita, NiS , que, durante a primeira etapa do processo de pirometalurgia (denominada "*roasting*"), é aquecido e pressurizado em atmosfera oxidante, resultando no gás SO_2 e no metal livre (Ni) em estado físico-químico adequado para posterior processamento ⁽⁴⁾. A Figura 1(b) apresenta um exemplo do elevado grau de comprometimento de uma estrutura soldada e eletrogalvanizada de sustentação dos cabos elétricos desta planta.



Figura 1. Vista parcial: (a) planta de produção de gases industriais. (b) Estrutura de sustentação de cabos elétricos severamente corroídos. Observam-se corrosão e deposição dos produtos de corrosão em regiões preferenciais dos banzos (inferior e superior) e dos montantes de união (indicados por setas).

A proteção proporcionada ao substrato de aço pelo recobrimento de Zn se baseia além dos mecanismos de barreira física entre o substrato e a atmosfera e de proteção catódica, com sacrifício do Zn quando a camada é eventualmente danificada, na geração dos compostos hidróxido de zinco, $\text{Zn}(\text{OH})_2$, e carbonato de zinco, ZnCO_3 , que formam uma película bastante fina e aderente ao substrato, permanecendo estável, mesmo sob condições ambientais moderadamente úmidas. No entanto, em contato com os compostos H_2SO_4 e H_2SO_3 , esta película protetora se transforma em sulfato de zinco, ZnSO_4 , um sal bastante solúvel em água. Não obstante, o $\text{Zn}(\text{OH})_2$ e o ZnCO_3 possuem características mais protetoras para o substrato de aço do que o ZnSO_4 , porém todos são considerados produtos da corrosão do metal ⁽⁵⁾.

Sendo assim, esse conjunto de fatores permite supor que a água da chuva não só tenha proporcionado a formação de um composto solúvel, mas o mais importante, tenha-o removido do local, expondo assim a camada de Zn subjacente a sucessivos ciclos de corrosão, remoção e exposição, ou seja, de desgaste. A existência de um produto de corrosão solúvel induz um acréscimo na taxa de corrosão, como decorrência da extrema mobilidade dos íons (no caso, Zn^{2+} e SO_4^{2-}) dissolvidos no eletrólito (H_2O), que reduzem a resistividade à corrente interna de corrosão.

Estabelece-se, deste modo, a importância fundamental da espessura da camada de Zn na proteção do substrato por longos tempos de exposição a um ambiente agressivo, tal como o

aqui relatado. Uma vez que o substrato de aço carbono comum seja exposto ao ambiente altamente corrosivo acima descrito, sua degradação será rápida, a despeito de certa proteção proporcionada pelo sacrifício da cobertura adjacente residual de Zn. Em princípio, toda a estrutura metálica estaria uniformemente sujeita a esta degradação intermitente, de lixiviamento da camada protetora de Zn ⁽⁶⁾.

Por outro lado, durante o ciclo de seca, a presença do ZnSO_4 é responsável por um processo contínuo de auto-geração, visto que o sal é excepcionalmente higroscópico, possibilitando assim a produção local de H_2SO_4 e H_2SO_3 , quando da disponibilidade de SO_2 . Neste caso, algumas regiões da estrutura esporadicamente localizadas em posições preferenciais de deposição e conseqüente acúmulo do produto de corrosão, após seu arraste pela água da chuva a partir de outros locais, estariam mais susceptíveis a este processo corrosivo adicional. Tais regiões estariam sujeitas, portanto, a um processo contínuo de degradação da camada protetora e do substrato eventualmente exposto, em um ciclo alternando respectivamente corrosão atmosférica aquosa (*atmospheric wet corrosion*) e úmida (*atmospheric damp corrosion*).

Ainda mais criticamente solicitadas, seriam as posições na estrutura metálica em que ocorrem estagnação e conseqüente acúmulo de água e dos ácidos corrosivos gerados, sem possibilidade da evaporação dos mesmos, como em descontinuidades tipo-fresta e construções geométricas mais complexas e/ou fechadas, pois estariam sujeitas aos mecanismos acima expostos, além de propiciarem as condições ideais à corrosão eletrolítica propriamente dita. Isto foi confirmado durante uma análise visual mais detalhada das amostras eletrogalvanizada coletadas no local. Foi revelado que as regiões de retenção de água, como as faces internas dos perfis montantes de suporte, apresentavam grandes quantidades de produtos de corrosão, mesmo a despeito das peças terem sido classificadas numa primeira inspeção como não atacadas, tendo em vista o aspecto íntegro das regiões visualmente mais acessíveis.

Feitas as devidas referências à agressividade do meio ambiente local e aos detalhes construtivos da estrutura metálica em questão, permanece por serem considerados os efeitos da soldagem da estrutura. Problemas intrínsecos à eletrogalvanização de juntas soldadas tipicamente decorrem de: excesso de detalhes geométricos, intencionais ou não, na junta soldada, rugosidade do cordão de solda, significativas alterações microestruturais do metal base, presença de tensões residuais induzidas por ciclos térmicos aplicados, e maus procedimentos de remoção química e/ou mecânica de resíduos depositados durante o processo de soldagem, que invariavelmente prejudicam, por efeitos de superfície, a qualidade da deposição do Zn eletrolítico ⁽⁷⁾. De fato, as análises visuais mais apuradas realizadas nas amostras tomadas no local confirmaram prontamente que, dentre todas as regiões criticamente corroídas, a que apresentava o quadro mais devastador de corrosão era exatamente aquela submetida a ciclos térmicos de soldagem e localizada em uma posição especialmente propícia ao acúmulo de água e de umidade.

A Figura 2 mostra um detalhe da estrutura de sustentação da fiação elétrica da planta. Observa-se onde se verifica o material resistente à corrosão, Zn depositado a quente, à direita, comparado ao material já criticamente comprometido, Zn eletrodepositado, à esquerda. A região acima referida, de máxima intensidade de corrosão, é indicada na foto por meio de setas. Destacam-se também nesta, os diferentes processos de montagem das estruturas, respectivamente encaixe e dobramento *versus* soldagem, e os rastros deixados durante o transporte dos produtos de corrosão pela água da chuva.

Na Figura 3, observa-se a extensiva deposição, após arrasto sob ação da gravidade, de produtos de corrosão em regiões preferenciais da superfície inferior da montagem metálica. O material depositado certamente provém da intensa corrosão sofrida pela face interna do perfil montante de união, que, como já referido, coleta, retém e acumula água, em função de sua geometria. Como também já mencionado, esses depósitos dão origem a um processo corrosivo local durante o ciclo de seca por meio da absorção de umidade.



Figura 2. Material resistente à corrosão (Zn depositado a quente, à direita) comparado ao material já comprometido (Zn eletrodepositado, à esquerda). Note os diferentes processos de montagem, níveis de qualidade dos acabamentos superficiais e quantidades de produtos de corrosão. Setas indicam a região mais criticamente corroída.

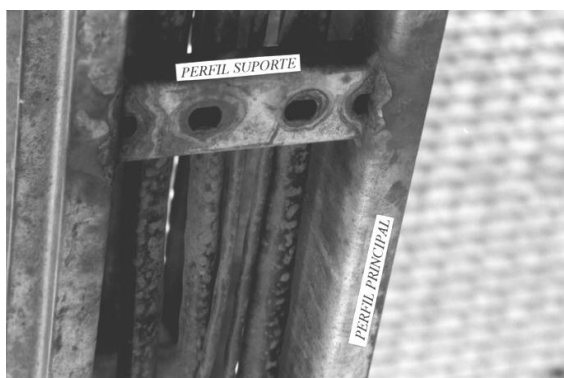


Figura 3. Detalhe de juntas soldadas em chapas eletrogalvanizadas, onde se observa a deposição preferencial dos produtos de corrosão originados no interior do perfil montante, que constitui uma região praticamente inacessível aos efeitos secativos do sol e dos ventos.

É importante salientar que os produtos de corrosão são potencialmente ricos em ácidos corrosivos, e observando-se a sua extensiva deposição sobre o recobrimento polimérico dos cabos elétricos, podem-se inferir riscos de pane no sistema elétrico da planta, em decorrência da perfuração dos revestimentos. Dessa maneira, não se deve descartar a possibilidade da geração de correntes de fuga, que deixariam o circuito normal, de cabos recobertos, para fluírem pela estrutura galvanizada em direção ao solo, intensificando, deste modo, o efeito de todos os mecanismos de corrosão abordados. Em contraste, a Figura 4 mostra uma montagem zincada a quente, onde se destaca seu excelente estado de

conservação, mesmo nas posições particularmente susceptíveis ao acúmulo de água e umidade.

Na Figura 5, observa-se um ataque corrosivo com geometria bastante simétrica em torno das juntas soldadas da estrutura eletrogalvanizada. Visto que a região não corresponde, em princípio, à de deposição preferencial de produtos de corrosão oriundos de outros locais e nem mesmo é uma região de retenção de água. Há fortes indícios, até mesmo pela geometria bastante regular e repetitiva dos danos, de que o ataque em questão decorre basicamente dos efeitos do processo de soldagem. Assim, a qualidade da camada de Zn depositada, e conseqüentemente, a sua proteção proporcionada ao substrato, provavelmente tenham sido comprometidas pelos fatores anteriormente mencionados, isto é, tensões térmicas residuais, alterações microestruturais no metal base durante os ciclos térmicos de soldagem, geração de pares galvânicos altamente localizados, práticas inadequadas de descontaminação pós-soldagem durante o preparo da superfície para deposição de Zn, etc.



Figura 4. Montagem zincada a quente completamente íntegra.



Figura 5. Detalhe do relativo confinamento do ataque corrosivo à região envolvida no processo de soldagem dos perfis.

A Figura 6 ilustra algumas sub-montagens eletrogalvanizadas para reposição, mantidas em depósito ao ar livre, onde se destacam os rastros deixados pela movimentação dos produtos de corrosão transportados a partir de regiões geometricamente favoráveis à retenção de água e umidade, bem como o intenso ataque corrosivo altamente localizado na região de solda dos perfis. Sendo o raio de alcance do SO_2 bastante extenso, as condições a que estão

expostas as peças de reposição provavelmente não sejam significativamente menos severas que aquelas experimentadas pelas que compõem a estrutura em serviço.

Os resultados de perda de massa de Zn depositado são fornecidos na Tabela 1, como função da espessura das camadas depositadas. Em todos os cálculos foi assumida a densidade do Zn puro, de $7,14 \text{ g/cm}^3$. Visto que a camada eletrodepositada é constituída de Zn puro e a depositada a quente é formada por intermetálicos Zn-Fe, portanto mais densa que a primeira, em princípio. Espera-se algum efeito de superestimativa da espessura da segunda camada quando se utiliza somente a densidade do Zn nos cálculos de perda de massa.



Figura 6. Peças de reposição eletrogalvanizadas, mantidas em depósito ao ar livre. Nota-se o formato extremamente favorável do perfil montante de suporte, com seção transversal em U e dobra adicional para enrijecimento, à retenção de água e umidade.

Tabela 1. Resultados de ensaios de perda de massa de Zn.

Recobrimento de Zn / Perfil	Espessura da camada (μm)
<i>Eletrodepositado / Principal</i>	7,82
<i>Eletrodepositado / Suporte</i>	7,95
<i>Imersão a quente / Principal</i>	51,37

Esses resultados mostram que a espessura da camada de Zn depositado por imersão a quente é quase uma ordem de grandeza superior à eletrodepositada. Também, verifica-se que o processo de eletrogalvanização teve, em princípio, a mesma eficiência sobre ambos os perfis (principal e de suporte), porém produziu uma espessura de camada muito aquém da mínima requerida para a finalidade.

É reconhecido que, para um ambiente severo como o aqui relatado, a mínima espessura requerida para a camada de Zn é da ordem de $25,0 \mu\text{m}$, que é plenamente satisfeita pelo recobrimento obtido por imersão a quente. De fato, para uma espessura de camada abaixo de $8,0 \mu\text{m}$, ou mesmo $25,0 \mu\text{m}$, segundo alguns autores mais conservativos, é esperado que o processo de eletrodeposição não produza uma estrutura suficientemente livre de falhas e porosidades que a habilite a desempenhar satisfatoriamente sua tarefa protetora do substrato. A Tabela 2 apresenta os resultados de análise química dos metais de base galvanizados. Esta análise mostra que os substratos correspondem a aços-carbono comuns de classificação SAE 1005 e SAE 1010. Não foi acusada presença de quaisquer elementos de liga, como Ni, Cr ou Cu, que pudessem proporcionar uma proteção específica contra intempéries.

Tabela 2. Composição química (% em peso) das chapas base.

Recobrimento de Zn / Perfil	C	Mn	P	S	Ni, Cr, Cu
<i>Eletrodepositado / Principal</i>	0,10	0,45	0,020	0,014	---
<i>Eletrodepositado / Suporte</i>	0,06	0,38	0,017	0,016	---
<i>Imersão a quente / Principal</i>	0,10	0,51	0,015	0,014	---

Na Figura 7(a), observa-se a camada de Zn obtida por imersão a quente, onde se ratifica o valor de espessura determinado no ensaio de perda de massa, conforme visto na Tabela 1. Verifica-se uma microestrutura típica de depósitos de Zn a quente, onde a difusão de átomos de Ferro e Zinco possibilita a formação de uma série de subcamadas de intermetálicos Zn-Fe, numa transição gradual do Fe quase puro, próximo à interface com o metal de base, até o Zn puro na superfície livre da camada. Como confirmado pela excelente adesão entre camada e substrato, o processo de difusão atômica proporciona o desenvolvimento de uma forte ligação química interfacial entre a camada protetora e o substrato, em oposição à simples ancoragem física desenvolvida no processo de eletrodeposição. Além de ser um processo economicamente mais viável que a eletrodeposição, particularmente para grandes cargas, é também amplamente reconhecida que a imersão a quente proporciona um perfeito selamento global das macro e micro-descontinuidades exibidas principalmente em estruturas metálicas soldadas e/ou contendo furações. Também se verifica na Figura 7(a), que o recobrimento apresenta um aspecto denso, homogêneo e íntegro, sem a presença de porosidades e trincamentos, indicando um adequado desempenho como barreira impermeável a gases e líquidos presentes no ambiente. A Figura 7(b) confirma tais expectativas.

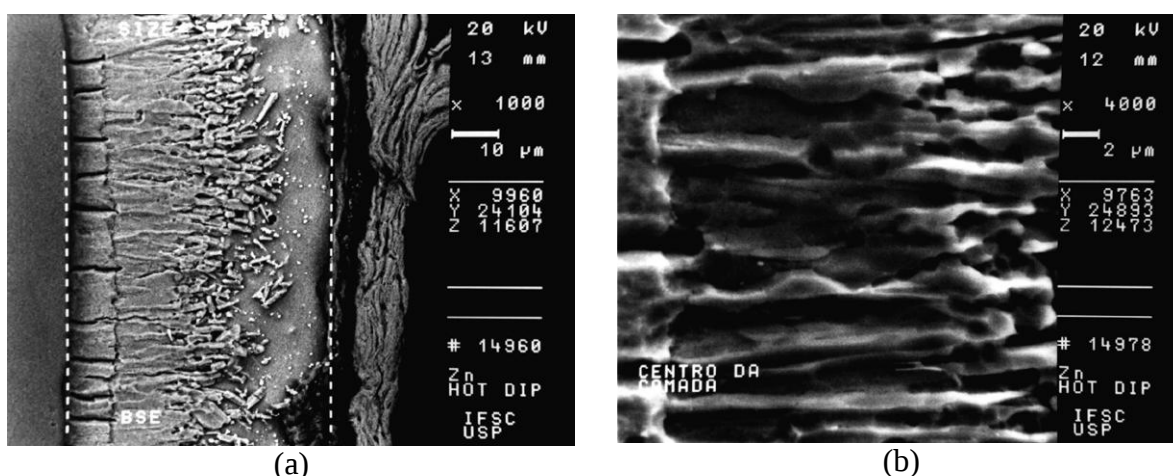


Figura 7. (a) Camada de Zn depositada pelo processo de imersão a quente (*hot dip*). Imagem obtida por elétrons retro-espalhados. (b) Detalhe da Figura 7(a). Imagem obtida por elétrons secundários.

Na Figura 8 é apresentada uma camada de Zn eletroliticamente depositada no perfil de união, numa posição muito próxima à do cordão de solda. Assim, tal como na Figura 7, utilizou-se a técnica de elétrons retro-espalhados (BSE, *backscattering electron*), que, ao contrário dos elétrons secundários, possibilita um forte contraste entre regiões com densidades distintas entre si.

Uma análise detalhada da Figura 8 permite enumerar, por intermédio das regiões destacadas na fotomicrografia, uma série de aspectos negativos relativos ao conjunto camada/substrato: a pobre aderência entre a camada e o substrato (região I); o desenvolvimento generalizado

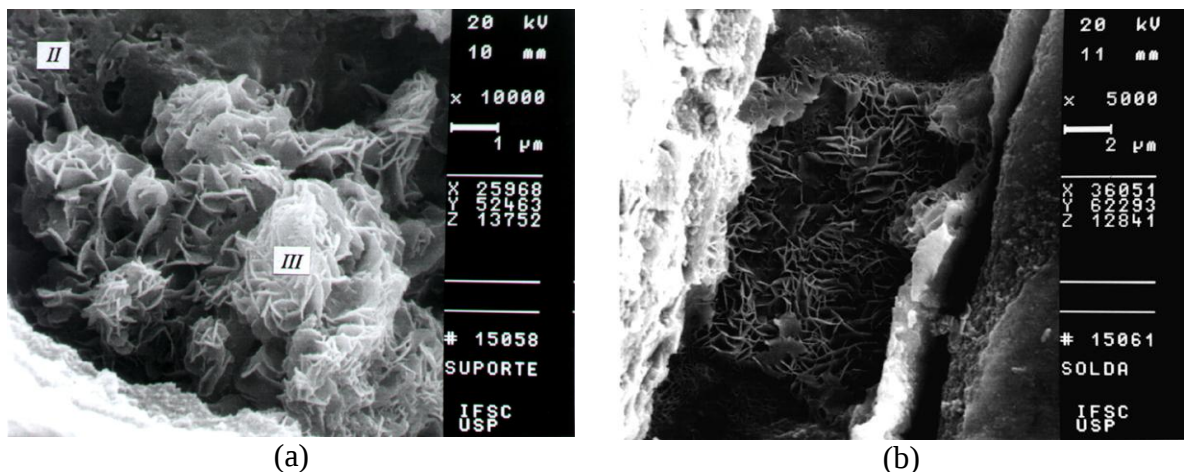


Figura 9. Morfologias do recobrimento eletrolítico de Zn sobre: (a) o metal do perfil de união/suporte (regiões II e III da Figura 8) e (b) o metal de solda.

A Figura 10 apresenta uma camada de Zn eletrodepositado, apresentando trincas que percorrem toda a extensão da espessura do recobrimento pseudoprotetor. O efeito destas trincas, relativamente ao substrato de aço, é basicamente idêntico ao proporcionado pelas morfologias permeáveis anteriormente ilustradas, que é o de permitir o ataque do metal base pela ação do ambiente, mesmo quando o recobrimento se encontra aparentemente íntegro, ou seja, em princípio, exatamente a partir do início da vida-útil em serviço da estrutura metálica.

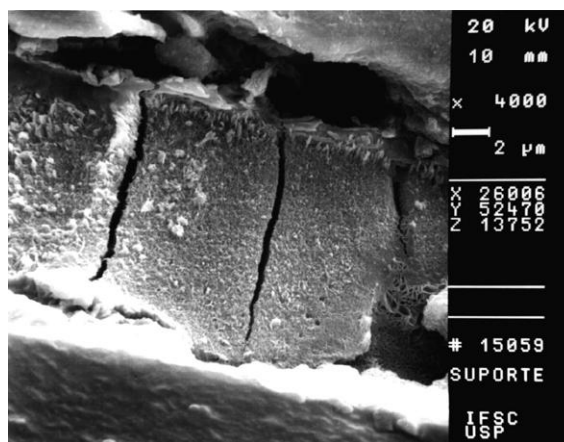


Figura 10. Trincamento do recobrimento eletrolítico de Zn, sobre o metal do perfil de suporte.

Tendo em vista que as morfologias e defeitos tipo trincas mostrados nas Figuras 8, 9 e 10 sempre se originaram em camadas depositadas sobre superfícies submetidas aos ciclos térmicos de soldagem, nunca estando mais distantes que 10,0 mm do cordão de solda. Pode-se inferir como já anteriormente enfatizado, possíveis e arrebatadores efeitos do próprio processo de soldagem e/ou do preparo (limpeza ou descontaminação) posterior da superfície, na má qualidade final do recobrimento eletrolítico.

A Figura 11 mostra um detalhe do metal do perfil de suporte, numa região também bastante próxima ao cordão de solda, onde se destacam, além do aspecto heterogêneo, irregular e defectivo da camada de Zn eletrodepositada, a brusca transição granulométrica apresentada pelo metal de base. Na medida em que se pode associar uma relativamente baixa resistência

à corrosão aos grãos mais grosseiros próximos à superfície da peça, pode-se também afirmar que esses não advieram dos ciclos térmicos de soldagem, mas sim do próprio processo de fabricação da chapa base, já que a face posterior da mesma apresentava idêntica transição. A Figura 12 ilustra o detalhe de uma junta soldada, onde se destaca uma fresta em cujas bordas não se detectou a presença de Zn, confirmando a ineficiência do processo eletrolítico na vedação/selamento das discontinuidades geométricas mais sutis. A fresta retém umidade e líquidos, dando origem a um processo de corrosão altamente localizado denominado corrosão por frestas. Além disso, é um poderoso intensificador de tensões, originando trincas que eventualmente experimentarão os fenômenos de corrosão sob tensão ou mesmo sob fadiga. A Figura 12(b) ilustra um defeito que pode ser classificado como tipo trinca, situado exatamente na raiz da fresta de uma junta soldada.

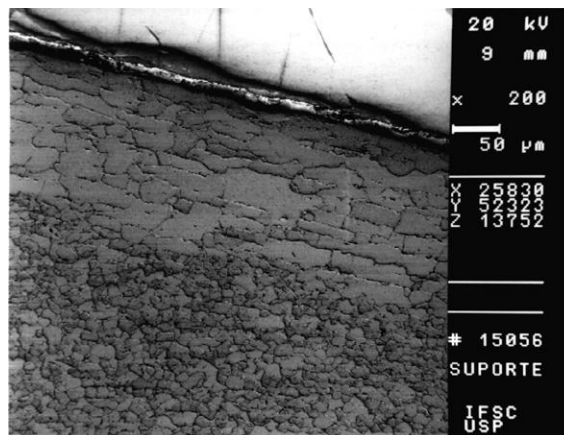


Figura 11. Granulação bastante grosseira do metal do perfil de união no contato com o recobrimento eletrolítico de Zn.

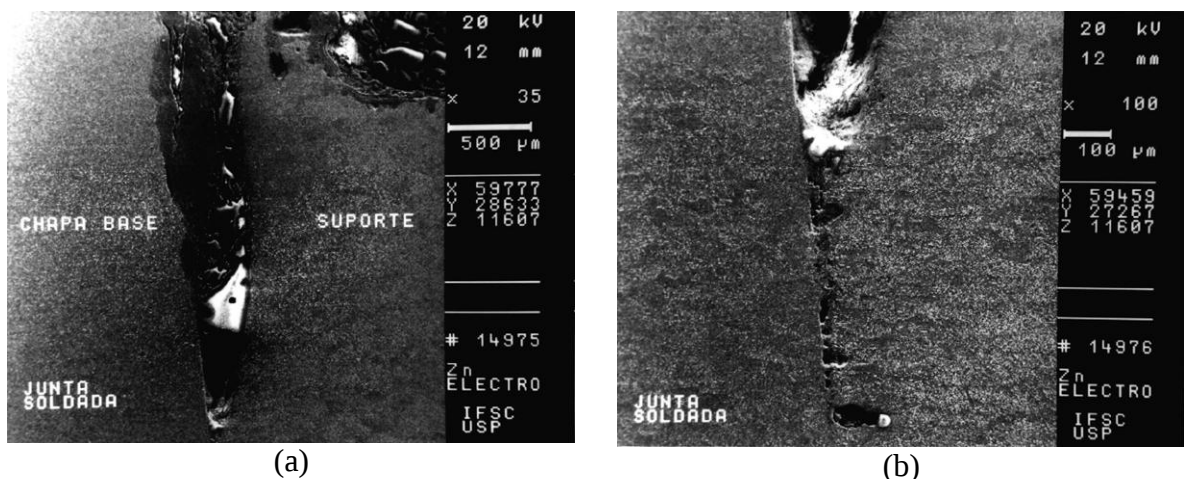


Figura 12. (a) Fresta tipo entalhe na junta soldada eletrogalvanizada. (b) Defeito tipo trinca na raiz da fresta (aumento da Figura 12(a)).

Conclusões

A corrosão experimentada pelos recobrimentos de Zn das estruturas metálicas de sustentação do sistema de cabos elétricos ocorreu basicamente por ataque de ácidos

sulfúrico e sulfuroso, gerados pela grande disponibilidade local de água da chuva e gás dióxido de enxofre liberado no processo de redução do minério de Níquel.

No evento da chuva, o processo de desgaste da camada protetora de Zn foi o de lixiviação (corrosão aquosa), enquanto que no período de seca a corrosão ocorreu devido ao acúmulo do produto solúvel e higroscópico de corrosão, ZnSO_4 , em locais preferenciais (corrosão úmida).

O ataque foi extremamente agressivo na estrutura eletrogalvanizada, enquanto que a zincada a quente (*hot dip*) permaneceu intacta. A sensível diferença de comportamento foi explicada em termos das diferenças entre os processos de deposição de Zn e dos distintos métodos de fabricação/montagem das duas estruturas.

Mecanismos adicionais de corrosão e/ou ataques corrosivos ainda mais intensos estabeleceram-se localmente na estrutura eletrogalvanizada, como decorrência da presença de detalhes construtivos e/ou de juntas soldadas.

Corrosão eletrolítica e corrosão por frestas foram desenvolvidas nestes locais, onde a estagnação da água da chuva e a retenção de umidade eram grandemente favorecidas.

As regiões acima mencionadas, particularmente aquelas sujeitas aos ciclos térmicos de soldagem, mostraram ser as mais criticamente corroídas. A ação corrosiva devastadora foi beneficiada por fatores inerentes à soldagem, como rugosidade superficial do cordão, alterações microestruturais e geração de pares galvânicos no metal base, bem como por más práticas de preparo da superfície para posterior zincagem, que comprometeram a qualidade do depósito de Zn eletrolítico e conseqüentemente seu desempenho como protetor do substrato.

Os metais de base recobertos com Zn foram identificados como aços carbono comuns de classificação 1005 e 1010, sem quaisquer adições de elementos de liga que proporcionassem resistência contra as intempéries.

A camada de Zn depositada a quente mostrou-se íntegra, homogênea e morfologicamente dentro dos padrões amplamente estabelecidos na literatura, corroborando seu excelente desempenho em serviço frente ao Zn eletrolítico.

A camada de Zn eletroliticamente depositada apresentou uma extensa gama de defeitos, incluindo porosidades e trincas, que a tornaram permeável à passagem de gases e líquidos, impossibilitando deste modo a proteção do substrato de aço. Foi demonstrado que, mesmo em regiões da estrutura eletrogalvanizada tidas numa inspeção corriqueira como íntegras, o ataque do metal subjacente muito provavelmente já esteja em processo, especialmente na região das juntas soldadas. Aparentemente, o material de reposição mantido em depósito ao ar livre está exposto a condições idênticas às das estruturas em serviço, passível, portanto, de rápido desenvolvimento de um quadro de corrosão atmosférica úmida e aquosa.

Foi ventilada a hipótese de correntes de fuga estarem intensificando o fenômeno de corrosão da estrutura eletrogalvanizada.

Referências bibliográficas

- (1) OLIVATO, D.J. Zincagem a quente. **Zinco e corrosão**, n.1, p.6-8, 2000.
- (2) ATKINS, P.W. **Físico-química**. Rio de Janeiro/RJ: LTC, 6.ed, 1999, 160p.
- (3) GALVITA <<http://www.galvita.com.br/galvanizacao.php>>. Acesso em: 27 out. 2009.
- (4) PEHLHE, R.D. *Pyrometallurgy I: Roasting – Agglomeration – Calcination, Chapter 2, Unit processes of extractive metallurgy*. Elsevier Science Publishing Co., 6.ed, 1984.

- (5) GENTIL, V. Corrosão eletrolítica; Revestimentos metálicos. **Corrosão**. Editora Guanabara, 2.ed, 1987.
- (6) RAMANATHAN, L.V. Capítulos: Corrosão em Diversos Meios; Controle da Corrosão; Técnicas Utilizadas no Estudo dos Produtos de Corrosão. **Corrosão e seu Controle**. Ed. Hemus, 1989.
- (7) METALS HANDBOOK. Corrosion, chapters: General Corrosion; Electroplated Coatings; Hot Dip Coatings; Corrosion of Carbon Steels; Corrosion of Zinc; Corrosion in Structures. **ASM Handbook Committee, American Society for Metals (currently Materials)**. Metals Park, Ohio, 9.ed, vol.13, 1985.

* * *