

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

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

Avaliação de sistemas de proteção anticorrosiva para manutenção de estruturas enterradas em aço galvanizado

Marcos Martins de Sá^a, Alberto Pires Ordine^b, Wendell Porto de Oliveira^c,
Cristina da Costa Amorim^d

Abstract

Galvanized steel is wide used in the electric sector, due to its good anticorrosive properties. For instance, it is employed as frameworks in towers of electric transmission lines. In foundations of some kind of towers, the material form metallic grids that are in direct contact with the soil. Depending on its composition, galvanized steel is subjected to different degrees of aggressiveness. Besides, corrosion processes in soil for galvanized steel are usually more intense than those in atmospheric exposure. Due to the age of the buried metallic structures (more than 30 years old), maintenance services are necessary. So, in this work, Cepel and Furnas investigated different anticorrosive system to be applied in buried structures presenting an intense corrosion condition (D degree of weathering). Structures in a real corrosion state were withdrawn from soil and treated with wet abrasive blasting. Three different paint systems were studied. Besides, two alternative protection systems were tested (a cement and epoxy coating and a soil-cement mixture).

Keywords: buried structures, soil, maintenance, anticorrosive protection.

Resumo

O aço galvanizado é bastante utilizado no setor elétrico por suas boas propriedades de proteção anticorrosiva. Por exemplo, é empregado em perfis que compõem torres de linhas de transmissão. Nas fundações de alguns tipos de torres, os perfis formam grelhas metálicas que ficam em contato direto com o solo. Dependendo do tipo de solo, o aço galvanizado fica sujeito a variadas condições de agressividade. Além disso, os processos de corrosão em solo, para aço galvanizado, costumam ser mais acelerados do que aqueles em condições de exposição atmosférica. Em função da idade avançada de boa parte das fundações metálicas enterradas (maior que 30 anos), no setor elétrico brasileiro, manutenções vêm sendo realizadas para recuperar estas estruturas. Assim, neste trabalho, o Cepel em conjunto com Furnas avaliou diferentes sistemas de proteção anticorrosiva para recuperação de estruturas enterradas, em processo avançado de corrosão (grau D de intemperismo). Foram utilizados perfis de torres de linhas de transmissão, em estado real de corrosão, retirados do solo e tratados por jateamento abrasivo úmido. Foram aplicados três esquemas de pintura, com diferentes mecanismos de proteção anticorrosiva, e testados mais dois sistemas de proteção alternativos (revestimento à base de cimento e resina epóxi e mistura solo-cimento).

Palavras-chave: estruturas enterradas, solo, manutenção, proteção anticorrosiva.

^a Técnico em Química - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

^b D. Sc. - Engenheiro Químico - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

^c D. Sc.-Engenheiro Mecânico - Eletrobras Furnas

^d M. Sc.-Química Industrial - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Introdução

No setor elétrico, é comum a utilização de estruturas metálicas em aço galvanizado, devido à boa resistência à corrosão deste material. Entretanto, em solos ou atmosferas muito agressivas, o revestimento de zinco tende a corroer com maior velocidade. Nestes casos, faz-se necessária a realização de serviços de manutenção mais frequentemente, de modo a preservar a integridade física das estruturas metálicas e aumentar a sua durabilidade. A aplicação de revestimentos por pintura é, normalmente, o tipo de serviço de manutenção mais utilizado. Neste caso, novas tecnologias são desenvolvidas constantemente, para a proteção anticorrosiva de estruturas aéreas e de estruturas enterradas.

Assim, visando à manutenção de superfícies de aço galvanizado, foi realizado um trabalho de pesquisa no Cepel, em conjunto com Furnas, com o objetivo de avaliar o desempenho à corrosão de alguns sistemas de proteção para estruturas enterradas. Avaliaram-se revestimentos por pintura, com diferentes mecanismos de proteção anticorrosiva e outras tecnologias, como uma mistura solo-cimento e um revestimento a base de cimento-resina epóxi. Os sistemas de proteção anticorrosiva foram aplicados em substratos de aço galvanizado, que se encontravam enterrados em solo, mas não mais apresentavam camada de galvanização, devido ao intenso processo corrosivo ao longo dos anos. As chapas foram tratadas por jateamento abrasivo úmido, antes da aplicação dos sistemas de proteção. Foram realizados ensaios de aderência, ensaios em diferentes tipos de solo e ensaio de imersão em solução de cloreto de sódio para caracterizar o desempenho anticorrosivo dos sistemas de proteção avaliados.

Metodologia

Os corpos-de-prova foram confeccionados a partir de perfis de aço galvanizado envelhecido, com ausência de revestimento de zinco e intensa corrosão do aço. Estes perfis apresentavam grau D de corrosão, de acordo com a norma ISO 8501-1 [1], com alvéolos bem profundos. Os perfis foram cortados em forma de chapas, nas dimensões aproximadas de 7 cm x 30 cm, e tratados por meio de jateamento abrasivo úmido. O abrasivo utilizado foi óxido de alumínio fornecido por Furnas, que utiliza o mesmo produto em trabalhos de manutenção de estruturas enterradas em campo. As chapas secaram ao ambiente, até a formação de uma fina camada de oxidação na superfície (*flash rust* leve). Em seguida, realizou-se um escovamento com escova de latão, desengorduramento com solvente orgânico (metiletilcetona), e aplicação dos revestimentos. A Figura 1 apresenta o aspecto das chapas antes e após o tratamento de superfície.



Figura 1 – Chapas de aço galvanizado, antes e após o tratamento de superfície.

Após a preparação de superfície, aplicaram-se os esquemas de pintura descritos nas Tabelas 1 e 2, cujos códigos serão utilizados neste trabalho para referenciar os resultados de desempenho anticorrosivo destes esquemas.

Tabela 1 – Esquemas de pintura para proteção de estruturas enterradas.

Código do Esquema	Tinta de fundo	Tinta intermediária/de acabamento	Espessura total (μm)
E1	EMA (130 μm)	EP.AH (2 demãos, 280 μm)	410
E4	EMA (130 μm)	EP.HB.IAH (2 demãos, 280 μm)	410
E5	MCU 85 (85 μm)	EP.HB.IAH (2 demãos, 280 μm)	365

Tabela 2 – Características técnicas das tintas utilizadas nos esquemas de pintura para proteção de estruturas enterradas.

Tinta	Características
EMA	Tinta de fundo epóxi mástique alumínio
MCU 85	Tinta de fundo rica em zinco à base de poliisocianato monocomponente e de cura com umidade do ar, com teor de zinco metálico na película seca de aproximadamente 85%
EP.AH	Tinta de acabamento epóxi contendo alcatrão de hulha
EP.HB.IAH	Tinta de acabamento epóxi de alto teor de sólidos, isenta de alcatrão de hulha

O esquema E1 é tradicionalmente conhecido por apresentar um bom desempenho na proteção de estruturas enterradas. Entretanto, por razões ecológicas, a tinta epóxi contendo alcatrão de hulha está em desuso e novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para a produção de tintas isentas de alcatrão de hulha, sem prejuízo às propriedades anticorrosivas dos revestimentos. Dessa forma, o esquema E4 é a alternativa mais ecológica ao esquema E1. O esquema E5 possui uma tinta de fundo rica em zinco (MCU 85), que, na presença de uma falha, garante um menor avanço de corrosão, quando comparada com um esquema com mecanismo de atuação do tipo “barreira”.

As tintas foram aplicadas no Cepel, por meio de trincha, obedecendo-se as recomendações técnicas dos seus respectivos fabricantes. A cura das tintas ocorreu ao ambiente, com umidade relativa do ar em torno de 65% e temperatura de 30 °C. Para cada esquema de pintura, o

intervalo entre demãos foi de 24h. Não houve problemas durante a aplicação dos esquemas de pintura e todas as camadas apresentaram-se homogêneas após a secagem e cura das tintas. O tempo de cura dos revestimentos antes do início dos ensaios foi superior a 30 dias. A Figura 2 apresenta o aspecto dos corpos-de-prova após aplicação dos esquemas de pintura. O aspecto irregular que se observa nos revestimentos dos esquemas é devido ao aspecto irregular do próprio substrato.

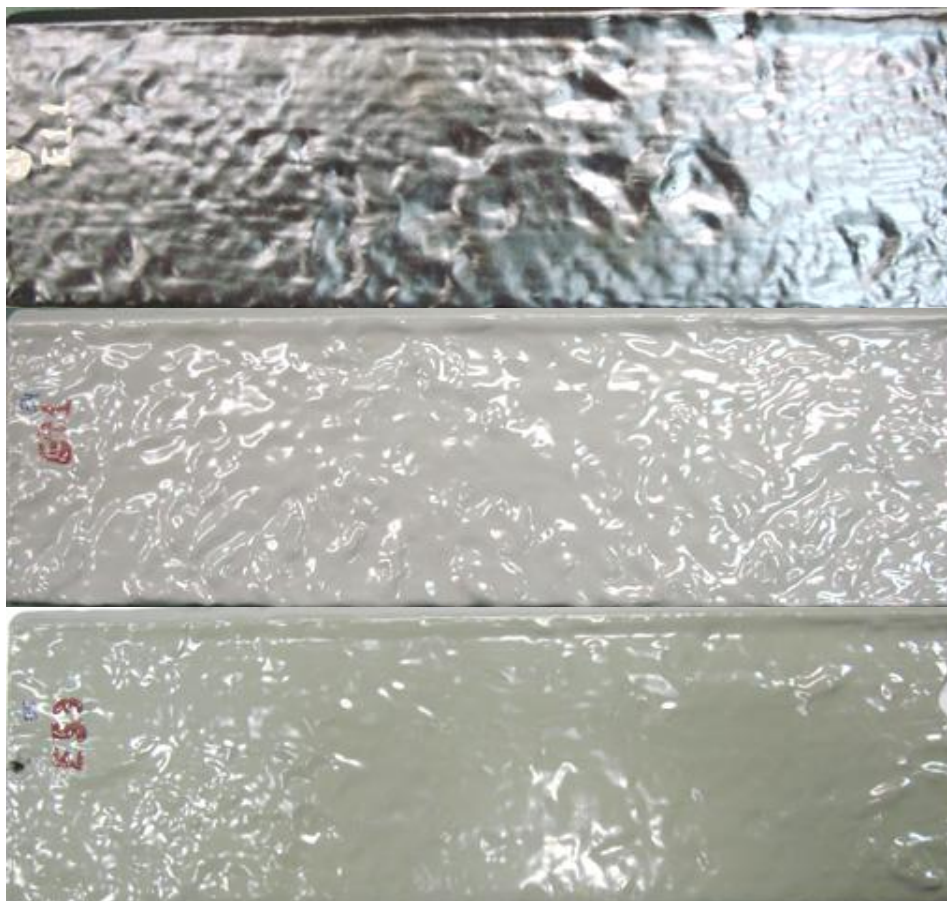


Figura 2 – Aspecto dos corpos-de-prova após pintura.

Além destes esquemas de pintura, mais dois sistemas de proteção anticorrosiva foram utilizados no estudo. Estes sistemas receberam a denominação de E6 e E7. O sistema E6 consistiu na aplicação de um revestimento contendo cimento e resina epóxi de base aquosa, em duas demãos, por meio de trincha. A primeira demão foi uma mistura cimento-epóxi e a segunda demão, somente uma resina epóxi (camada selante), que foi aplicada após uma hora de secagem da primeira demão. Este sistema foi aplicado em duas condições de cura diferentes. A primeira foi ao ambiente de laboratório, com umidade relativa de 65% e temperatura em torno de 30 °C. Nesta condição, a cura do revestimento ocorreu por mais de 30 dias antes dos corpos-de-prova serem enterrados. Na segunda condição de cura, a aplicação do revestimento ocorreu no local de ensaio, em um dia com tempo aberto com temperatura ambiente em torno de 35 °C. Após a aplicação, esperou-se quatro horas para enterrar os corpos-de-prova. Desse modo, simulou-se uma condição mais real de serviço, para avaliar o desempenho deste sistema. Os corpos-de-prova que tiveram o tempo de cura superior a 30 dias foram identificados pelo código “E6”. Já aqueles preparados quatro horas

antes do ensaio foram identificados como “E6b”. Os corpos-de-prova de ambos os sistemas, “E6” e “E6b” foram enterrados no mesmo dia. A Figura 3 apresenta o aspecto característico dos corpos-de-prova após aplicação do esquema E6. A espessura média obtida com este sistema foi de 1,0 mm.



Figura 3 – Aspecto característico dos corpos-de-prova protegidos com o sistema E6.

O sistema E7 consistiu na aplicação de uma mistura contendo solo e cimento. Esta mistura continha água, cimento, areia e solo, e recobriu as chapas previamente tratadas por jateamento abrasivo úmido. Estas chapas serão denominadas de CP1. Além destas chapas, na mesma mistura foi enterrada uma chapa de aço-carbono, inicialmente com carepa de laminação intacta, preparada por jateamento abrasivo seco, ao metal branco (grau Sa3, conforme ISO 8501-1 [1]). Esta chapa foi incluída para se ter uma referência de comparação de desempenho e será denominada de CP2. Sobre a mistura solo-cimento, a proporção entre os componentes (em volume) foi de: 10 partes de solo; 3 partes de areia; 1 parte de cimento; 2 partes de água.

O solo foi previamente peneirado, para a retirada de detritos e sua homogeneização. Foram preparados dois tipos de mistura, denominados de “mistura não agressiva” e “mistura agressiva”. Na primeira, o solo, a areia e o cimento foram homogeneizados e, em seguida, a água foi adicionada. Na “mistura agressiva”, durante a etapa de homogeneização do solo com a areia e o cimento, adicionou-se cloreto de sódio (NaCl), ou seja, antes da adição da água. A quantidade de NaCl adicionada foi tal que seu teor na mistura pronta seria aproximadamente 3,5%.

Cada mistura foi vertida sobre uma abertura no terreno do Cepel, com dimensões aproximadas de (0,5 m x 0,5 m x 0,5 m), equivalente a um volume de 125 L, onde os corpos-de-prova foram dispostos. Após a secagem das misturas, houve a formação de duas massas solidificadas. Em cada mistura, enterraram-se quatro corpos-de-prova de aço galvanizado envelhecido preparado por jateamento abrasivo úmido (CP1) e um corpo-de-prova de aço-carbono preparado por jateamento abrasivo seco, ao metal branco (CP2). Esta disposição é ilustrada na Figura 4.



Figura 4 – Corpos-de-prova e suas localizações nas misturas do sistema E7.

Em relação aos ensaios, foram realizados testes de aderência nos corpos-de-prova revestidos, antes e após os ensaios de resistência à corrosão, através do método de resistência à tração (ASTM D 4541 [2]). Os ensaios de resistência à corrosão compreenderam ensaio de imersão em solução de cloreto de sódio 3,5%, na temperatura de $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$, por 4128 horas, e ensaios dos corpos-de-prova enterrados em solo, em diferentes condições.

Dois destes últimos foram realizados com solos previamente peneirados e homogeneizados para a retirada de detritos, dentro de caixas d'água de 250 L. Em uma das caixas, o solo foi mantido molhado com água potável, visando simular uma condição de solo propícia para acelerar eventuais processos corrosivos. Em outra caixa, ao solo utilizado foi misturado cloreto de sódio, de modo a se obter uma concentração de 3,5% de NaCl, tornando o solo bem agressivo. Ambos os solos eram molhados e as caixas d'água continham drenos no fundo para permitir o escoamento da água. A Figura 5 ilustra o ensaio.



Figura 5 – Corpos-de-prova que foram enterrados para o ensaio em solo úmido e no solo úmido com cloreto de sódio.

Adicionalmente, os corpos-de-prova foram enterrados em solo, previamente peneirado e homogeneizado, para a separação de detritos, no terreno do Cepel, em uma condição natural

de exposição, portanto sujeita às variações de umidade e temperatura de acordo com as mudanças climáticas. A Figura 6 mostra esta condição de ensaio.



Figura 6 – Corpos-de-prova enterrados para o ensaio no terreno do Cepel.

Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta os resultados de aderência por resistência à tração, na condição inicial, ou seja, antes dos corpos-de-prova serem submetidos aos ensaios de desempenho.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de aderência, referentes à condição inicial.

Sistema	Aderência por tração (ASTM D 4541 [2])	
	Tensão de ruptura (MPa)	Natureza da Falha
E1	16,9	A/B
E4	9,2	C
E5	4,5	B/C
E6	5,2	B

Pelo método de resistência à tração, a verificação do grau de aderência consiste, basicamente, em determinar a resistência do revestimento a um esforço de tração. Além dos valores de tensão de ruptura, também se avaliou a natureza da falha de aderência, conforme a seguinte descrição:

A = falha coesiva do substrato

A/B = falha adesiva entre o substrato e a primeira camada do revestimento

B = falha coesiva da primeira camada do revestimento

B/C = falha adesiva entre as camadas B e C do revestimento

C = falha coesiva da camada C

C/Y = falha adesiva entre a camada C e o adesivo

Y = falha coesiva do adesivo

Y/Z = falha adesiva entre o adesivo e o carretel

Com relação ao ensaio de imersão em solução de cloreto de sódio 3,5%, ao longo do tempo de ensaio, as seguintes observações foram registradas:

- 768 horas, os corpos-de-prova revestidos com o sistema E5, nas duas faces de cada, aparecimento de bolhas com frequência 1 a 3 e tamanho médio a grande (S2 ou maior), avaliado conforme a norma ISO 4628/2 [3].
- 768 horas, os corpos-de-prova revestidos com o sistema E6 apresentaram alguns pontos de corrosão.

Ao final do ensaio (4128 horas), as seguintes observações foram registradas:

- Sistemas E1 e E4: nenhuma alteração quanto a corrosão, empolamento e fendimento.
- Sistema E5 apresentou grandes bolhas isoladas, de tamanho S5 (ISO 4628/2 [3]).
- Sistema E6 apresentou pontos de corrosão vermelha isolados devido à porosidade do revestimento.

Nas imagens da Figura 7, mostram-se corpos-de-prova do esquema E5 após a remoção das bolhas, evidenciando que o empolamento ocorreu entre a tinta de fundo e a tinta de acabamento. E com o sistema E6, apresentado na Figura 8, observaram-se pontos de corrosão isolados, o que se justifica pela porosidade deste sistema e pela agressividade do ensaio de imersão.



Figura 7 - Aspecto dos corpos-de-prova revestidos com o sistema E5 após 4128 horas de imersão em solução de NaCl 3,5%, a 40°C.



Figura 8 - Aspecto do corpo-de-prova revestido com o sistema E6 após 4128 horas de imersão em solução de NaCl 3,5%, a 40°C.

Após o ensaio de imersão, e da avaliação de desempenho dos corpos-de-prova, mediu-se a aderência dos diferentes sistemas de proteção pelo método de resistência à tração, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de aderência, após ensaio de imersão em NaCl 3,5% (4128 horas).

Sistema	Aderência por tração (ASTM D 4541 [2])	
	Tensão de ruptura (MPa)	Natureza da Falha
E1	21,6	C/Y
E4	19,5	C
E5	8,1	B/C
E6	9,9	A/B

Devido ao avançado grau inicial de corrosão do substrato, acarretando uma grande irregularidade da superfície dos corpos-de-prova, é importante ter em mente que os resultados de aderência devem ser interpretados com certo cuidado. Para se obter confiabilidade nos resultados, além do uso de réplicas, procurou-se colar os carretéis em áreas o mais planas possível. Mesmo assim, resultados que sejam aparentemente incoerentes se justificam pela irregularidade da superfície dos substratos utilizados neste estudo.

Pela Tabela 4, o sistema E1 apresentou bom resultado de aderência, com valor alto de tensão de ruptura. O sistema E4 apresentou uma boa aderência, ao contrário dos sistemas E5 e E6, que apresentaram baixos valores de tensão de ruptura e naturezas de falha adesivas. No caso do E5, a falha foi entre a tinta de fundo e a de acabamento, mostrando que não houve boa aderência entre as demãos, um resultado que foi observado também inicialmente (Tabela 3) e que justifica o empolamento observado entre estas demãos. No caso do sistema E6, a falha foi entre o substrato e o revestimento.

No ensaio em caixa d'água na condição de solo úmido, após um ano de exposição, os corpos-de-prova foram desenterrados para avaliação de desempenho dos diferentes sistemas de proteção. A Tabela 5 mostra os resultados da análise do solo utilizado neste ensaio, no início e após um ano de ensaio. Nesta análise, os parâmetros obtidos são referentes ao extrato aquoso da amostra de solo, preparado utilizando-se 200 gramas de solo seco em 800 gramas de água

de grau analítico. O pH foi determinado utilizando-se um medidor de pH e a condutividade, um condutivímetro. O teor de cloreto foi determinado por colorimetria, com o auxílio de soluções de sulfato férrico amoniacal e tiocianato mercúrico. O teor de sulfato foi determinado por turbidimetria, com o emprego de solução de cloreto de bário em meio ácido. Pela Tabela 5, verifica-se tratar-se de um solo de pH neutro, com condutividade em torno de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (comparativamente, a água da torneira no Rio de Janeiro tem condutividade aproximadamente igual a 65 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e baixos teores de contaminantes cloreto e sulfato. Comparando-se as análises nos dois períodos, verificou-se que as características do solo se mantiveram razoavelmente estáveis durante o tempo de ensaio considerado.

Tabela 5 – Análise do solo no início e após um ano do ensaio em solo natural úmido.

Data	pH	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Teor de Cloreto (mg/kg)	Teor de Sulfato (mg/kg)
Início do ensaio	7,3	112	1	2
Após um ano do início do ensaio	8,6	125	3	< 1

Observou-se um bom estado de todos os corpos-de-prova, ao final do ensaio. De fato, com exceção do sistema E5, todos os demais não apresentaram qualquer alteração quanto à corrosão, empolamento e fendimento, após um ano deste ensaio. O sistema E5 foi o único que apresentou algumas bolhas isoladas. Para tornar evidente a presença destas bolhas, o revestimento aonde as mesmas encontravam-se foi removido, revelando que tal empolamento ocorreu entre a demão da tinta de fundo e a de acabamento. A Figura 9 mostra imagens após a retirada do revestimento nas regiões de bolhas, no caso do sistema E5. Este resultado reproduz aquele observado após o ensaio de imersão em solução de NaCl 3,5%, para o sistema E5.

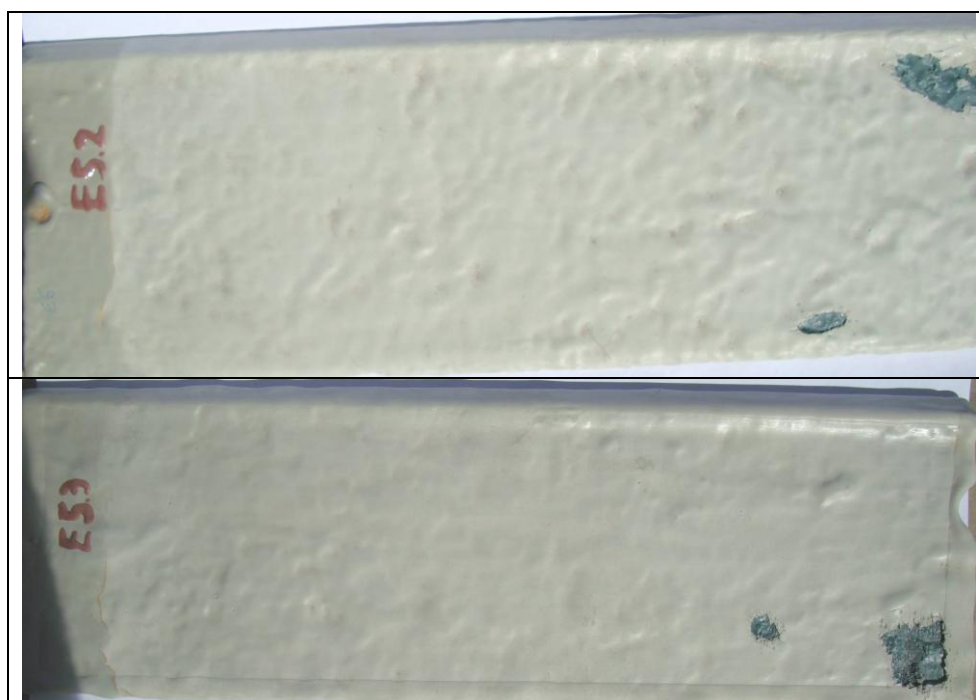


Figura 9 – Aspecto dos corpos-de-prova revestidos com o sistema E5, após um ano de ensaio em solo natural úmido, e após a remoção do revestimento nas regiões de bolhas.

A aderência pelo método de resistência à tração também foi medida após este ensaio e os resultados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados de aderência, após um ano de ensaio em solo natural úmido.

Sistema	Aderência por tração (ASTM D 4541 [2])	
	Tensão de ruptura (MPa)	Natureza da Falha
E1	14,8	C
E4	11,3	C
E5	10,7	B/C
E6	10,4	A/B
E6b	4,2	A/B

Pela Tabela 6, os sistemas E1 e E4 apresentaram bons resultados de aderência, com valores altos de tensão de ruptura e natureza de falha coesiva. Já os sistemas E5, E6 e E6b apresentaram naturezas de falha adesivas. No caso do E5, a falha foi entre a tinta de fundo e a de acabamento, mostrando que não houve boa aderência entre as demãos, um resultado que foi observado também inicialmente e que, mais uma vez, justifica o empolamento observado entre estas demãos. No caso dos sistemas E6 e E6b, a falha foi entre o substrato e o revestimento.

No ensaio em solo úmido, na caixa d'água contendo cloreto de sódio, os corpos-de-prova foram avaliados após um ano de exposição. A Tabela 7 mostra os resultados da análise do solo utilizado neste ensaio, no início e após um ano de ensaio. Nesta análise, os parâmetros foram obtidos da mesma forma que no ensaio anterior. Verifica-se tratar-se, inicialmente, de um solo de pH neutro, com alta condutividade e alto teor de cloreto. De fato, na condição inicial, foi um solo bem mais agressivo do que no caso do ensaio em solo natural úmido. Porém, comparando-se as análises nos dois períodos, verificou-se uma acentuada queda na condutividade do solo e no teor de cloreto. Isto se justifica pela molhagem periódica do solo com água potável, com o propósito de mantê-lo sempre úmido. Entende-se que houve uma remoção do cloreto presente no solo pelas constantes molhagens do mesmo, ao longo do ensaio.

Tabela 12 – Análise do solo no início e após um ano do ensaio em solo úmido, contendo cloreto de sódio.

Data	pH	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Teor de Cloreto (mg/kg)	Teor de Sulfato (mg/kg)
Início do ensaio	6,9	9902	3305	11
Após um ano do início do ensaio	7,7	257	8	1

Nota: Este resultado indica que para manter constante a contaminação do solo neste tipo de ensaio é necessário investigar uma metodologia alternativa. Para pesquisas futuras, sugere-se a molhagem do solo com solução salina, avaliando-se a concentração da solução e a frequência de molhagem, com o auxílio da monitoração periódica dos teores de contaminantes do solo.

Os corpos-de-prova, com exceção daqueles revestidos pelo sistema E5, não apresentaram qualquer alteração quanto à corrosão, empolamento e fendimento, após um ano deste ensaio. O sistema E5 foi o único que apresentou algumas bolhas isoladas. Para tornar evidente a presença destas bolhas, o revestimento, aonde as mesmas encontravam-se, foi removido, revelando que tal empolamento ocorreu entre a demão da tinta de fundo e a de acabamento. A Figura 10 mostra imagens após a retirada do revestimento nas regiões de bolhas, no caso do

sistema E5. Este resultado reproduz aqueles observados após os ensaios anteriores, para o sistema E5.

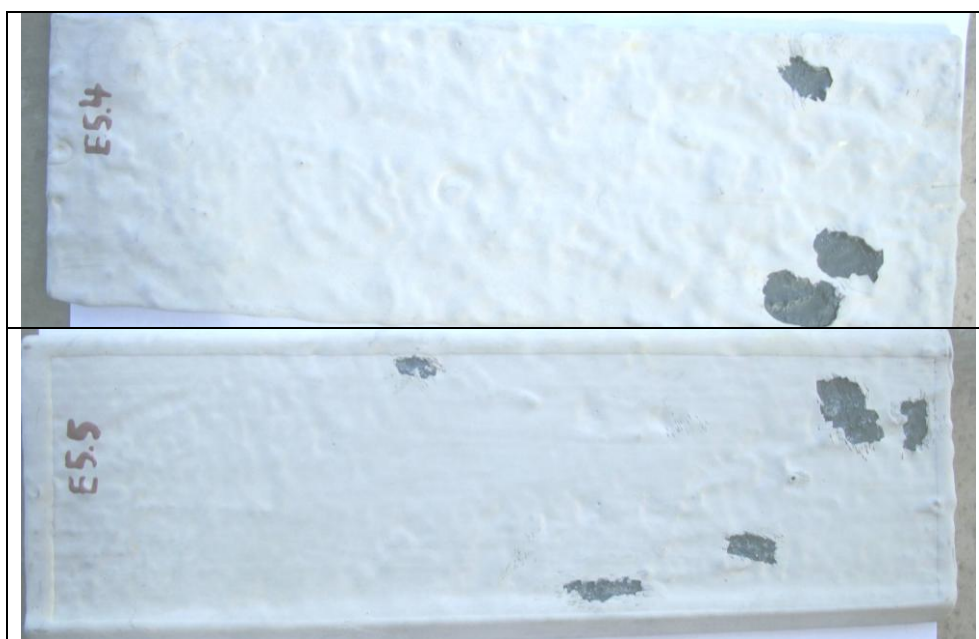


Figura 10 – Aspecto dos corpos-de-prova revestidos com o sistema E5, em ensaio em solo úmido, contendo NaCl, e após a remoção do revestimento nas regiões de bolhas.

Os resultados de aderência pelo método de resistência à tração, após um ano de ensaio em solo úmido, contendo cloreto de sódio, estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados de aderência, após um ano de ensaio em solo úmido, com NaCl.

Sistema	Aderência por tração (ASTM D 4541 [2])	
	Tensão de ruptura (MPa)	Natureza da Falha
E1	15,7	C
E4	10,7	C
E5	10,4	B/C
E6	6,2	A/B
E6b	1,8	A/B

Pela Tabela 13, os sistemas E1 e E4 apresentaram bons resultados de aderência, com valores altos de tensão de ruptura e natureza de falha coesiva. Os sistemas E5, E6 e E6b apresentaram naturezas de falha adesivas. No caso do E5, a falha foi entre a tinta de fundo e a de acabamento, mostrando que não houve boa aderência entre as demãos, um resultado que foi observado também inicialmente e que, mais uma vez, justifica o empolamento observado entre estas demãos. No caso dos sistemas E6 e E6b, a falha foi entre o substrato e o revestimento.

No ensaio no terreno do CEPEL, após um ano de ensaio os corpos-de-prova foram desenterrados para avaliação de desempenho dos diferentes sistemas de proteção. De fato, com exceção do sistema E5, todos os demais não apresentaram qualquer alteração quanto à corrosão, empolamento e fendimento, após um ano deste ensaio. O sistema E5 foi o único que apresentou algumas bolhas isoladas. Para tornar evidente a presença destas bolhas, o

revestimento aonde as mesmas encontravam-se foi removido, revelando que tal empolamento ocorreu entre a demão da tinta de fundo e a de acabamento. Este resultado reproduz aqueles observados nos ensaios anteriores, para o sistema E5. A Figura 11 apresenta alguns dos corpos-de-prova.

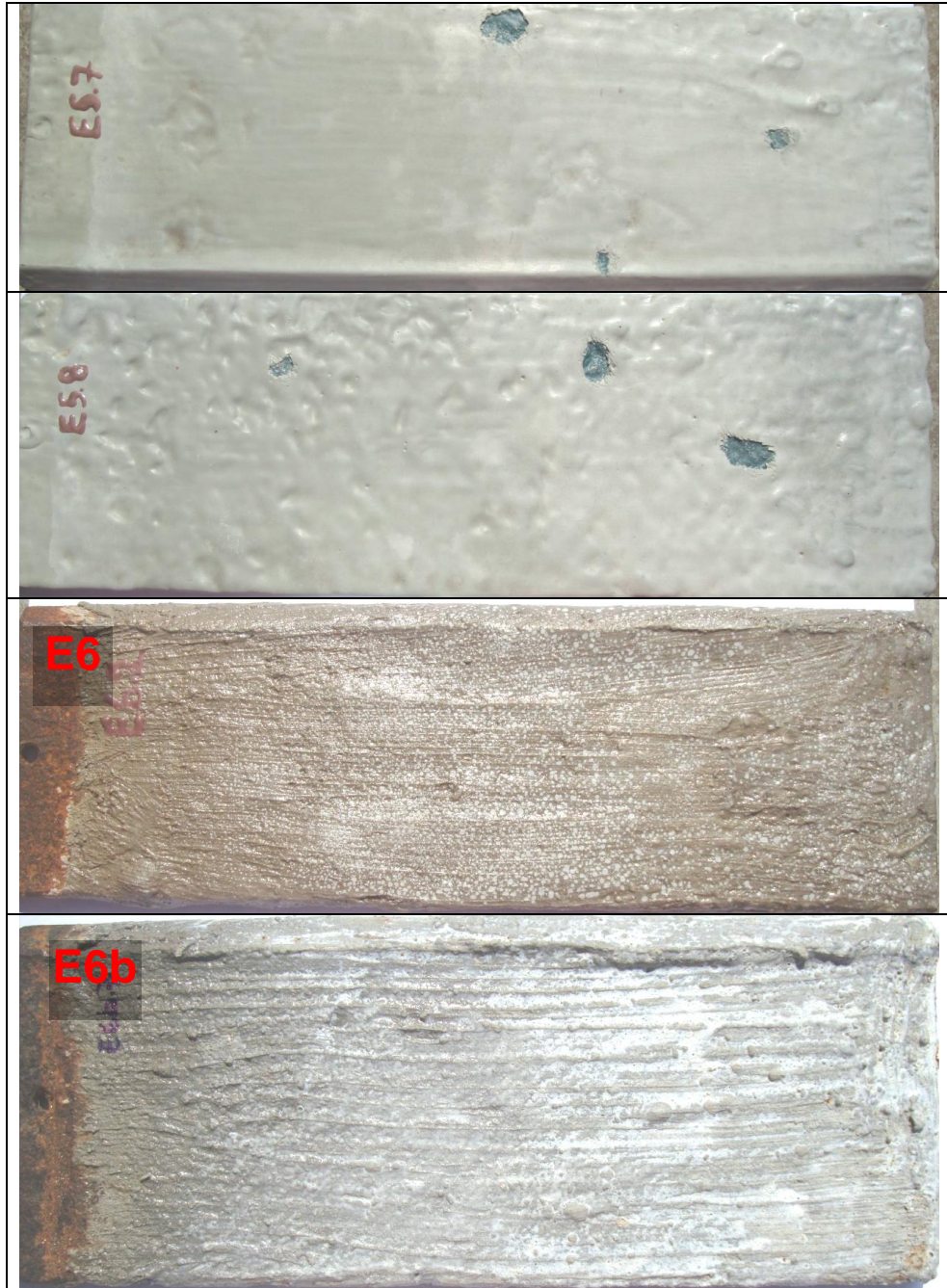


Figura 11 – Aspecto dos corpos-de-prova, revestidos com os sistemas E5, E6 e E6b, após um ano de ensaio no terreno do CEPTEL.

Quanto à aderência pelo método de resistência à tração, após um ano de ensaio em terreno do CEPTEL, os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados de aderência, após um ano de ensaio em terreno do CEPTEL.

Sistema	Aderência por tração (ASTM D 4541 [2])	
	Tensão de ruptura (MPa)	Natureza da Falha
E1	19,8	C
E4	14,2	C
E5	9,6	B/C
E6	4,2	20% A/B; 80% B
E6b	8,7	A/B

Pela Tabela 14, os sistemas E1 e E4 apresentaram bons resultados de aderência, com valores altos de tensão de ruptura e natureza de falha coesiva. Os sistemas E5, E6 e E6b apresentaram naturezas de falha adesivas. No caso do E5, a falha foi entre a tinta de fundo e a de acabamento, mostrando que não houve boa aderência entre as demãos, um resultado que foi observado também inicialmente e que, mais uma vez, justifica o empolamento observado entre estas demãos. No caso dos sistemas E6 e E6b, observaram-se falhas de aderência entre o substrato e o revestimento.

Avaliação do Sistema de Proteção Anticorrosiva Contendo a Mistura Solo e Cimento

Este ensaio completou 15 meses, e para encerrá-lo e avaliar os corpos-de-prova, foi necessário o emprego de uma britadeira que quebrou os blocos de cimento, permitindo a retirada dos corpos-de-prova.

A Figura 12 mostra o aspecto dos corpos-de-prova logo após a retirada do ensaio, em que estes estão dispostos tal como estiveram no solo-cimento, ou seja, com a parte inferior voltada para baixo. Verifica-se que houve uma boa reprodutibilidade entre as réplicas e que a corrosão vermelha do substrato avançou de baixo para cima, provavelmente em função da ascensão da umidade do solo, por capilaridade, vindo da parte inferior do bloco de cimento. O avanço desta corrosão foi mais intenso na mistura solo-cimento que continha sal, o que é bem coerente, uma vez que o sal é higroscópico e acelerou a ascensão da umidade do solo através do bloco de cimento. Portanto, o ensaio com a mistura que continha sal foi, de fato, mais agressivo.



Figura 12 – Aspecto dos corpos-de-prova imediatamente à retirada do ensaio.

Adicionalmente, uma chapa havia sido enterrada diretamente no solo, e também foi deixada nesta condição durante 15 meses. A Figura 13 apresenta esta chapa e verifica-se a corrosão

vermelha em toda a sua área. Se comparada com os corpos-de-prova enterrados na mistura solo-cimento, verifica-se que aonde a umidade não chegou, de fato, as superfícies estiveram protegidas, mostrando a boa eficiência da proteção deste sistema.



Figura 13 – Aspecto da chapa de grau D, preparada por meio de jateamento abrasivo úmido e enterrada diretamente no solo do CEPTEL por 15 meses, sem qualquer sistema de proteção.

Em resumo, as Tabelas 15 e 16 apresentam uma comparação qualitativa entre os resultados observados com os sistemas de proteção anticorrosiva avaliados. O critério adotado para se classificar como “bom resultado” (✓) nos ensaios de aderência foi não ter sido observada natureza de falha A/B, nem B/C e ter sido registrada tensão de ruptura maior que 10 MPa. No caso dos ensaios de desempenho anticorrosivo, o “bom resultado” (✓) foi quando não se observou corrosão vermelha, empolamento, nem fendimento.

Tabela 15 – Resumo dos resultados obtidos com os sistemas de proteção anticorrosiva destinados à manutenção de estruturas enterradas.

Sistema de proteção anticorrosiva	Sistema: de cura rápida (CR); ecológico (E); de baixo custo (BC)	Uniformidade do sistema após sua aplicação e cura	Desempenho no ensaio de aderência			
			Após ensaio de imersão em NaCl	Após ensaio em solo natural úmido	Após ensaio em solo úmido, com cloreto	Após ensaio no terreno do CEPTEL
E1 EMA/EP.AH	Tradicional	✓	✓	✓	✓	✓
E4 EMA/EP.HB.IAH	✓(E)	✓	✓	✓	✓	✓
E5 MCU 85/EP.HB.IAH	✓(CR,E)	✓	✗	✗	✗	✗
E6 cimento+epóxi	✓(BC)	✓	✗	✗	✗	✗
E6b cimento+epóxi	✓(CR,BC)	✓	----	✗	✗	✗

Tabela 16 – Resumo dos resultados obtidos com os sistemas de proteção anticorrosiva destinados à manutenção de estruturas enterradas (continuação).

Sistema de proteção anticorrosiva	Resultados dos ensaios de desempenho anticorrosivo			
	Ensaio de imersão em NaCl	Ensaio em solo natural úmido	Ensaio em solo úmido, contendo cloreto	Ensaio no terreno do CEPTEL
E1 EMA/EP.AH	✓	✓	✓	✓
E4 EMA/EP.HB.IAH	✓	✓	✓	✓
E5 MCU 85/ EP.HB.IAH	✗	✗	✗	✗
E6 cimento+epóxi	✗	✓	✓	✓
E6b cimento+epóxi	----	✓	✓	✓

Conclusões

Este estudo permitiu avaliar o desempenho de diferentes sistemas de proteção anticorrosiva, desenvolvidos por tecnologias modernas, visando a manutenção de perfis de aço galvanizado de estruturas de linhas de transmissão e subestações, submetidas a fatores de agressividade encontrados em solos.

Com base nos resultados do estudo, pode-se concluir que:

- O sistema de referência (E1) e o sistema E4 foram aqueles que apresentaram os melhores desempenhos em todos os ensaios realizados. Apesar do ensaio de imersão em solução de NaCl 3,5% não ser uma condição real de trabalho para os sistemas estudados, foi um ensaio importante pois, devido a sua agressividade, permitiu diferenciar o desempenho dos sistemas. Mesmo neste ensaio, o sistema E4 teve um bom desempenho, com a vantagem de sua tinta de acabamento ser isenta de alcatrão de hulha, portanto é um ganho ecológico em relação à tinta de acabamento do esquema E1. Como se sabe, o alcatrão de hulha está sendo substituído devido a sua toxicidade e problemas de contaminação para o meio ambiente. Assim, o sistema E4 é uma boa alternativa ao sistema E1 na manutenção de estruturas enterradas, para uma variada condição de agressividade do solo.

- O sistema E5 não apresentou uma boa aderência entre as demãos da tinta de fundo e da tinta de acabamento. Tal resultado contribuiu para o empolamento observado entre estas demãos em todos os ensaios realizados, mesmo no menos agressivo, como o ensaio no terreno do CEPTEL. Este sistema seria interessante pelo fato de apresentar uma tinta de fundo rica em zinco, de “cura rápida” e uma tinta de acabamento “ecológica”, isenta de alcatrão de hulha. Por ser um sistema com grande potencial de um bom desempenho anticorrosivo e ainda, uma alternativa menos tóxica que o sistema E1, em projetos de pesquisa futuros no CEPTEL, pode se estudar melhor a compatibilidade entre as tintas de fundo e de acabamento do sistema E5. Ou até mesmo propor como tinta de fundo uma tinta epóxi rica em zinco. Porém, por enquanto, diante dos resultados obtidos, não se recomenda a utilização deste sistema na proteção de estruturas enterradas.

- Os sistemas E6 e E6b apresentaram desempenhos equivalentes em todos os ensaios realizados, o que mostra que se pode aplicar o sistema E6 algumas horas antes de se enterrar os perfis recuperados, sem prejuízo às propriedades de proteção anticorrosiva. Este sistema tem alta espessura, é fácil de ser aplicado, e apresentou bom desempenho anticorrosivo, em condição enterrada, mesmo a que continha cloreto de sódio. Apenas na condição extrema, de imersão, havendo a degradação da camada de resina de acabamento, verifica-se a formação de pontos de corrosão, devido à porosidade inerente à primeira demão de cimento-resina epóxi.

Sobre o sistema de proteção anticorrosiva constituído pela mistura solo-cimento, pode se concluir que:

- Nas áreas dos corpos-de-prova que estiveram protegidas pela mistura e isentas de umidade, a proteção conferida foi efetiva. No caso da mistura mais agressiva, a presença de cloreto tornou a ascensão da umidade do solo mais acelerada, por efeito de capilaridade, havendo assim uma maior área de corrosão vermelha.

- Sugere-se o emprego desta técnica com bons resultados, que podem ser aprimorados havendo um isolamento entre a base do bloco de solo-cimento e o solo. Dessa forma, haveria uma “barreira” à passagem da umidade do solo. Este isolamento poderia ser feito com pedras, ou brita, por exemplo. Além da boa proteção anticorrosiva, a mistura solo-cimento tem a vantagem de apresentar baixo custo.

Referências Bibliográficas

- [1] ISO 8501-1, “Preparation of Steel Surfaces Before Application of Paints”, Genève (1988).
- [2] ASTM D 4541, “Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers”, 2002.
- [3] ISO 4628/2, “Paints and varnishes – Evaluation of degradation of paint coatings – Designation of intensity, quantity, size of common types of defect – Part 2: Designation of degree of blistering”, 1982.