

---

Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

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

## **Influência dos graus de limpeza de superfície no desempenho anticorrosivo de tinta rica em zinco**

Isabela M. A. Silva<sup>a</sup>, Idalina Vieira Aoki<sup>b</sup>, Fernando Cotting<sup>c</sup>, Elber V. Bendinelli<sup>d</sup>, Marcos M. de Sá<sup>e</sup>, Maria Cindra Fonseca<sup>f</sup>, Isabel Cristina P. Margarit-Mattos<sup>g</sup>

### **Abstract**

---

The purpose of this paper was to evaluate how different surface treatments of carbon steel influence the performance of a painting system with zinc rich primer. The surface treatments were applied to pre-corroded samples until degrees Sa3 as reference, St3 and SP11. Afterwards, the samples were painted with zinc rich primer, intermediate epoxy and polyurethane top coat. The specimens were subjected to cyclic corrosion test. The performance evaluation considered adhesion loss, blistering and corrosion advance around scribe. Electrochemical tests were carried out, including monitoring of open circuit potential and anodic polarization curves. The advantages of SP11 treatment compared to St3 were evidenced for the adherence and service-life of the painting system. However, consistent with previous results, a more important corrosion advance occurred around the risks in samples with SP11 treatment. Directly related to this greater advance, is the higher surface anodic activity detected by scanning vibrating electrode technique. Hypotheses justifying this behavior are heterogeneities in residual surface tension, as detected by X-ray measurements, and fouling with metallic material from the rotating brush.

**Keywords:** surface treatment, zinc rich primer, maintenance, SSPC-SP11.

### **Resumo**

---

O objetivo deste trabalho foi avaliar como diferentes tratamentos superficiais para aço carbono influenciam o desempenho de um sistema de pintura com tinta de fundo rica em zinco. Amostras corroídas foram tratadas até os graus Sa3, St3 e SP11. Em seguida, essas amostras foram pintadas com tinta rica em zinco, tinta epóxi intermediário e tinta de acabamento de poliuretano. As amostras pintadas foram submetidas a ensaio cíclico de corrosão. A avaliação de desempenho considerou perda de aderência, empolamento e avanço de corrosão em torno da incisão. Foram realizados testes eletroquímicos, incluindo monitoramento de potencial de circuito aberto e curvas de polarização anódica. As vantagens do tratamento SP11 em comparação com St3 foram evidenciadas para a aderência e vida útil

---

<sup>a</sup>Graduanda, Bolsista PIBIC - UFRJ

<sup>b</sup>Doutora - Escola Politécnica/USP

<sup>c</sup>Doutor - Escola Politécnica/USP

<sup>d</sup>Mestre - CEPEL

<sup>e</sup>Técnico em química - CEPEL

<sup>f</sup>Doutora - UFF

<sup>g</sup>Doutora - LNDC/Escola Politécnica/COPPE/UFRJ

do esquema de pintura. No entanto, de forma coerente com resultados anteriores, foi detectado avanço de corrosão mais importante a partir do risco nas amostras com tratamento SP11. Diretamente relacionada com esse maior avanço, está a maior atividade anódica da superfície SP11 detectada por técnica de varredura com eletrodo vibratório. Hipóteses que justificam esse comportamento são heterogeneidades na tensão superficial residual, conforme detectado por medições de raios-X, e incrustações com material metálico da escova rotatória.

**Palavras-chave:** tratamento de superfície, tinta rica em zinco, manutenção, SSPC-SP11.

## Introdução

---

O desempenho anticorrosivo eficiente de um esquema de pintura depende não apenas da natureza química das tintas utilizadas, mas da condição de superfície do substrato no momento da aplicação (1). É consenso que entre os métodos de preparação, o jateamento abrasivo é o mais eficiente na remoção de contaminantes, limpeza de produtos de corrosão e na abertura de perfil de rugosidade (2 - 4). Porém, em condições de serviço onde o jateamento não pode ser utilizado se recorre às ferramentas mecânicas ou manuais. Cada uma dessas ferramentas tem sua especificidade e aplicabilidade dependendo das condições de operação e do local onde se encontra a estrutura metálica a ser tratada. As ferramentas que geram os graus de limpeza St2 e St3, de acordo com a norma ISO 8501-1 (5), embora muito utilizadas e de fácil manuseio, dificilmente retiram sais solúveis e óxidos da superfície eficientemente, causando falhas prematuras nos esquemas de pintura. Existem outras ferramentas com proposta de maior eficiência na limpeza de superfície, tais como: as ferramentas mecânico-rotativas, que produzem o grau de limpeza SP11 (6). No entanto, essas ferramentas são mais indicadas para limpeza de pequenas áreas (6), devido ao seu baixo rendimento em comparação às ferramentas St3.

A eficiência anticorrosiva de revestimentos, cujo mecanismo de proteção é por barreira, com diferentes tratamentos de superfície, vem sendo abordada na literatura (2, 3, 4, 7). Esses trabalhos confirmam que as ferramentas mecânico-rotativas além de promoverem melhor limpeza, são capazes de abrir perfil de rugosidade superior a St3. Porém, um aspecto negativo constatado para o tratamento SP11 é o maior avanço de corrosão em torno de falhas na camada de pintura que expõem o substrato metálico (2, 7). A capacidade de conter o avanço de corrosão é muito importante para qualquer esquema de pintura. No caso das tintas ricas em zinco, elas são capazes de conter o avanço de corrosão em torno de uma falha, devido ao mecanismo de proteção catódica. Entretanto, existe carência de informação sobre a influência do tratamento SP11 no avanço de corrosão a partir da incisão (falha) para tintas ricas em zinco e sobre sua vida útil.

O objetivo desse trabalho é comparar o desempenho de um esquema de pintura com tinta rica em zinco (TRZ), aplicada em aço tratado com os graus de limpeza: SP11, St3 e Sa3. A metodologia experimental inclui ensaio cíclico de corrosão em laboratório, medidas eletroquímicas e ensaios complementares para justificar os resultados de desempenho anticorrosivo.

---

## **Metodologia**

---

### **Preparação dos corpos de prova para pintura**

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de chapas de aço carbono SAE 1010 com dimensões de 100 mm x 150 mm x 48 mm. As chapas foram expostas a intemperismo natural na estação de corrosão atmosférica do Cepel, classificação C4 de acordo com a Norma ISO 9223 (8), pelo período de 17 meses. Durante esse tempo, as chapas foram contaminadas com sulfato de ferro 1% (p/p) uma vez por semana. Após o ensaio nesta estação, as chapas apresentaram grau D de corrosão. Posteriormente, as chapas foram lavadas com água destilada pressurizada ( $\approx 3500$  psi) por um minuto em cada face e submetidas a três tratamentos de superfície diferentes: i) jateamento abrasivo, utilizado como referência, com granalha de aço angular até o grau de limpeza Sa3; ii) lixadeira elétrica até o grau de limpeza St3 (5) e iii) limpeza com ferramenta mecânico-rotativa até o grau SP11 (6), contendo cerdas metálicas indicadas para aço carbono ( 98,150% Fe, 0,188% Ni, 0,705% Zn, 0,705% Mn, 0,059% Pb, 0,029% Cr) . Amostras de cada tipo foram encaminhada para análise de pH, condutividade e sais solúveis segundo método A da norma ABNT NBR 13797 (9). Essas análises são feitas após imersão da amostra em água em ebulição por 30 min. A rugosidade típica de cada tratamento foi medida com microscópio Confocal Zeiss Axio CSM 700.

### **Pintura**

Amostras com os diferentes tratamentos superficiais foram pintadas com uma demão de 80  $\mu\text{m}$  de tinta rica em zinco, uma demão de 200  $\mu\text{m}$  de tinta intermediária epóxi de alta espessura e duas demãos de 60  $\mu\text{m}$  de tinta de acabamento de poliuretano. O método de aplicação utilizado foi pistola convencional. A espessura seca total do revestimento foi aproximadamente 400  $\mu\text{m}$ . O ensaio de corrosão foi realizado com amostras sem incisão e com incisão no revestimento expondo o aço base. A incisão foi feita com buril, no centro da amostra, paralelo à sua maior dimensão (10).

### **SVET e Tensometria por difração de raios-X**

Com a técnica de SVET foi feita a caracterização da atividade eletroquímica das superfícies de aço, submetidas aos tratamentos Sa3, St3 e SP11 em torno de áreas riscadas com buril. O objetivo da tensometria foi avaliar possíveis diferenças de tipo e nível de tensão residual, remanescente na superfície do aço carbono, oriunda dos tratamentos Sa3, St3 e SP11. Os corpos de prova utilizados para os dois tipos de caracterização foram confeccionados a partir de chapas de aço carbono SAE 1010 e com dimensões de 10 x 10 mm. Inicialmente, todos os corpos de prova foram jateados para a remoção da carepa de laminação e uniformização da superfície. Dessas amostras, duas permaneceram jateadas, duas foram tratadas com lixadeira elétrica empregada no tratamento St3 e duas foram tratadas com escova rotativa utilizada no tratamentos SP11. Em seguida, essas amostras foram riscadas com buril e analisadas por SVET em torno das áreas de risco.

O equipamento utilizado foi da marca Applicable Eletronics, controlado pelo software ASET-Sciencewares. O tratamento de dados foi realizado no software QuikGrid versão 5.4. Foi utilizado como eletrodo vibratório um microeletrodo de platina/irídio da marca MicroProbes, contendo um depósito de platina em sua ponta de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . Nestes ensaios

também foram utilizados dois eletrodos auxiliares de platina. Os ensaios de SVET foram conduzidos em solução de NaCl 0,01 mol/L e em todos os ensaios a distância entre a superfície analisada (metal) e o eletrodo vibratório foi de 150  $\mu\text{m}$ . A distância entre os pontos horizontais adjacentes em que as medidas de correntes iônicas foram realizadas foi de 100  $\mu\text{m}$  e a varredura foi realizada após os tempos de imersão de 10 minutos, 1 hora e 2 horas.

As tensões residuais típicas de cada tratamento de superfície foram medidas pela técnica de tensometria por difração de raios-X utilizando o método  $\text{sen}^2\psi$ . Foi utilizado o analisador Xstress3000, fabricado pela Stresstech, utilizando radiação ( $\lambda\text{CrK}\alpha = 2,291 \text{ \AA}$ ), difratando o plano (211) da ferrita, com ângulo de  $2\theta = 156,4^\circ$ . Foram realizadas leituras sob cinco ângulos de inclinação ( $\psi$ ) em cada ponto. O software apresenta, para cada ponto medido, gráfico com 5 leituras que relacionam a distância interplanar (d) com ângulo de inclinação ( $\psi$ ). A tensão residual no ponto é a média das cinco leituras e as margens de erro são calculadas em relação à linha de tendência. As medições foram realizadas nas direções longitudinal (L) e transversal (T) em relação ao sentido do passe de cada ferramenta para amostras em duplicata.

### **Curvas de polarização e monitoração de potencial**

O objetivo desses ensaios é caracterizar a influência dos tratamentos de superfície sobre a proteção catódica oferecida pela TRZ ao aço carbono. Curvas de polarização anódica foram realizadas em meio de NaCl 3,5% com célula eletroquímica de três eletrodos, onde: o eletrodo de trabalho foi chapa de aço pintada apenas com TRZ, o eletrodo de referência foi de calomelano saturado (ECS) e o contra-eletrodo de grafite. As curvas foram obtidas após 1h de estabilização do potencial de circuito aberto (OCP), até sobretensão anódica de 0,2V, com velocidade de varredura de 0,1mV/s. O equipamento utilizado foi o potenciostato Metrohm PGSTAT 302N. No mesmo tipo de amostra, foi feita monitoração do OCP ao longo do tempo de imersão, por um período de aproximadamente 250 dias, sem expor nenhuma área do aço para acelerar o processo de corrosão.

### **Ensaio cíclico de corrosão atmosférica**

Amostras em triplicata de cada tratamento superficial, revestidas com esquema completo (TRZ + Epoxi intermediária + Poliuretano) foram submetidas a 39 ciclos no ensaio de corrosão atmosférica, totalizando 6.552 horas de ensaio. Cada ciclo era composto das seguintes etapas: 72h de exposição à câmara de ultravioleta (UV-B) com condensação, 24h em freezer à temperatura de  $-10^\circ\text{C}$  e 72h de exposição à névoa salina de acordo com a norma ASTM B117 (11). O desempenho avaliado neste trabalho considera perda de aderência e avanço de corrosão em torno de incisão. A aderência do foi avaliada pelo método de resistência à tração, de acordo com a norma ASTM D 4541 (12). O aparelho utilizado foi o Elcometer 110, modelo PATTI®. Os resultados são expressos em MPa. Além dos valores de tensão de ruptura também se avaliou a natureza da falha.

## Resultados e Discussão

### Eficiência na remoção de contaminantes

Na Tabela 1 estão os resultados de condutividade, pH, cloreto e sulfato que caracterizam a contaminação das superfícies após cada tratamento, assim como o grau de rugosidade. O valor de rugosidade obtido para o tratamento SP11 confirma que o tratamento realizado nas amostras desse trabalho atende ao requisito mínimo de rugosidade especificado em norma (6), ou seja, maior que 25 $\mu$ m, mesmo considerando a grande dispersão das medidas. Em média o perfil de rugosidade típico de SP11 é maior que St3 ou Sa3.

Na comparação do pH, o maior nível de acidez verificado com tratamento St3 pode ser consequência da hidrólise ácida dos produtos de corrosão presentes nos alvéolos remanescentes após o tratamento.

**Tabela 1-** Rugosidade, pH, teor de cloretos e sulfatos típicos de cada tratamento superficial.

Tratamento	Rugosidade ( $\mu$ m)	Condutividade ( $\mu$ S/cm à 20°C)	pH	Cloreto ( $\mu$ g Cl <sup>-</sup> /cm <sup>2</sup> )	Sulfato ( $\mu$ g SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /cm <sup>2</sup> )
St3	71 $\pm$ 61	252,2	3,3	1,9	0,07
Sp11	99 $\pm$ 46	51,0	4,8	1,1	0,02
Sa3	47 $\pm$ 21	6,9	6,9	0,4	< 0,01

### Polarização anódica

Na Figura 1 estão curvas de polarização anódica do aço carbono com os diferentes tratamentos de superfície (Sa3, St3 e SP11), pintado com tinta rica em zinco (TRZ) em NaCl 3,5% (p/p). Os resultados mostram deslocamento da curva anódica da amostra com tratamento St3 (StTRZ) no sentido de menores correntes, aproximadamente uma ordem de grandeza de diferença, quando comparada com as curvas das amostras jateada (SaTRZ) e com tratamento SP11 (SpTRZ). Uma possível explicação é a grande quantidade de óxido que o tratamento St3 deixa na superfície (2, 4), dificultando o contato elétrico entre o aço e as partículas de zinco. Com o contato elétrico prejudicado, essas áreas não terão a proteção catódica das partículas de zinco metálico.

No caso das amostras SpTRZ e SaTRZ as curvas são coincidentes. O contato elétrico entre a TRZ e aço é mais eficiente, devido à boa limpeza da superfície, promovendo maiores correntes quando comparadas a amostra StTRZ, sugerindo melhores condições para a proteção catódica do aço.

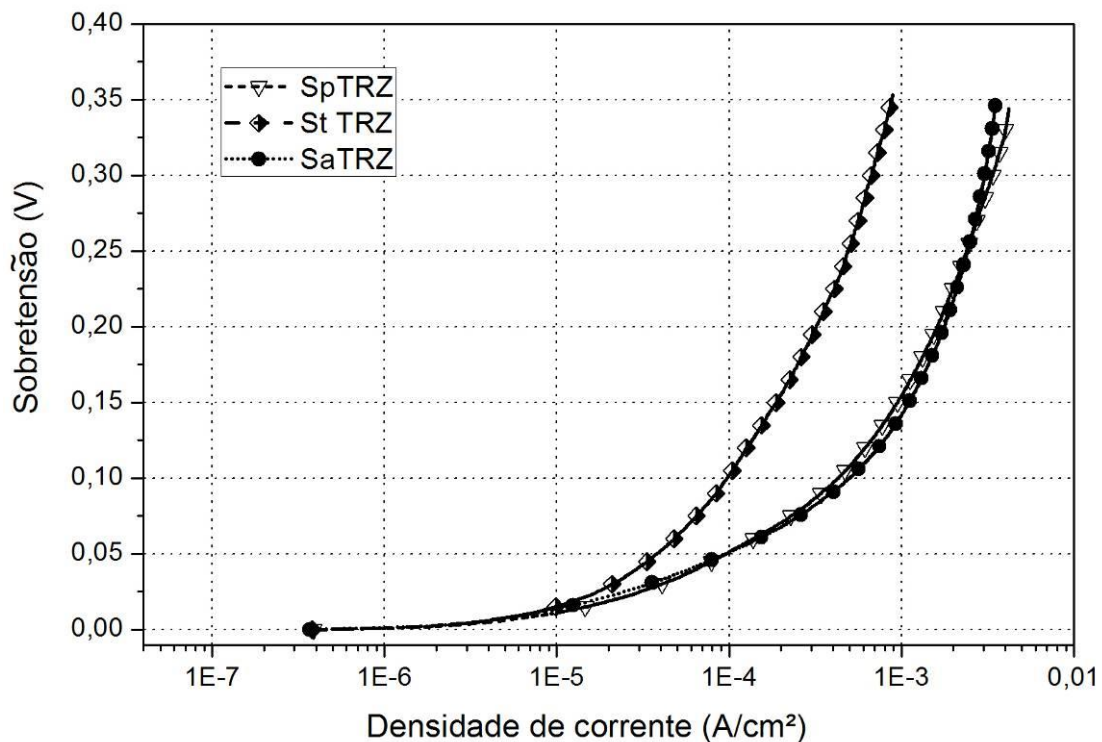


Figura 1 - Curvas de polarização anódica para o aço carbono em solução de NaCl 3,5% pintado com tinta rica em zinco após diferentes tratamentos de superfície.

### Medidas de potencial de circuito aberto

A Figura 2 exibe a variação do potencial de circuito aberto ao longo do tempo, até aproximadamente 250 dias de imersão em solução de NaCl 3,5%. Este ensaio foi realizado sem expor área de aço para o meio corrosivo.

Na Figura 2, inicialmente todas as amostras demonstraram o mesmo comportamento até aproximadamente 25 dias de ensaio, com o potencial em torno de  $-1,00 V_{ECS}$ , típico do par Fe-Zn. Este fato indica, inicialmente, bom contato entre aço e zinco contido na camada de tinta. Porém, aos 25 dias de ensaio, o potencial de StTRZ começou a subir rapidamente, atingindo após 80 dias o potencial de  $-0,55 V_{ECS}$ , valor característico da corrosão do aço. Em relação à SpTRZ, seu potencial só começou a aumentar após 125 dias de ensaio. A amostra SaTRZ não apresentou grande variação de potencial durante o período de teste, permanecendo entre  $-1,00 V_{ECS}$  e  $-0,95 V_{ECS}$ , sugerindo somente oxidação do zinco e proteção catódica para o aço. Essa interpretação se confirma com o aspecto visual das amostras, onde SaTRZ possui apenas corrosão branca, em contraste com StTRZ que apresentou maior área comprometida com corrosão vermelha. A amostra SpTRZ apresentou corrosão vermelha intermediária. Portanto, a TRZ aplicada em superfície St3 deixou de proteger o aço muito antes dos demais esquemas.

Este resultado está de acordo com as curvas de polarização mostradas anteriormente, que indicavam menores densidades de correntes para StTRZ. As medidas de potencial de amostras em imersão foram mais seletivas do que as curvas de polarização, pois permitiram diferenciar a influência dos três tratamentos de superfície sobre o desempenho da TRZ. Nesse aspecto,

SP11 teve desempenho mais próximo de Sa3, apresentando vantagem sobre St3, no que diz respeito ao tempo de proteção catódica oferecida por TRZ.

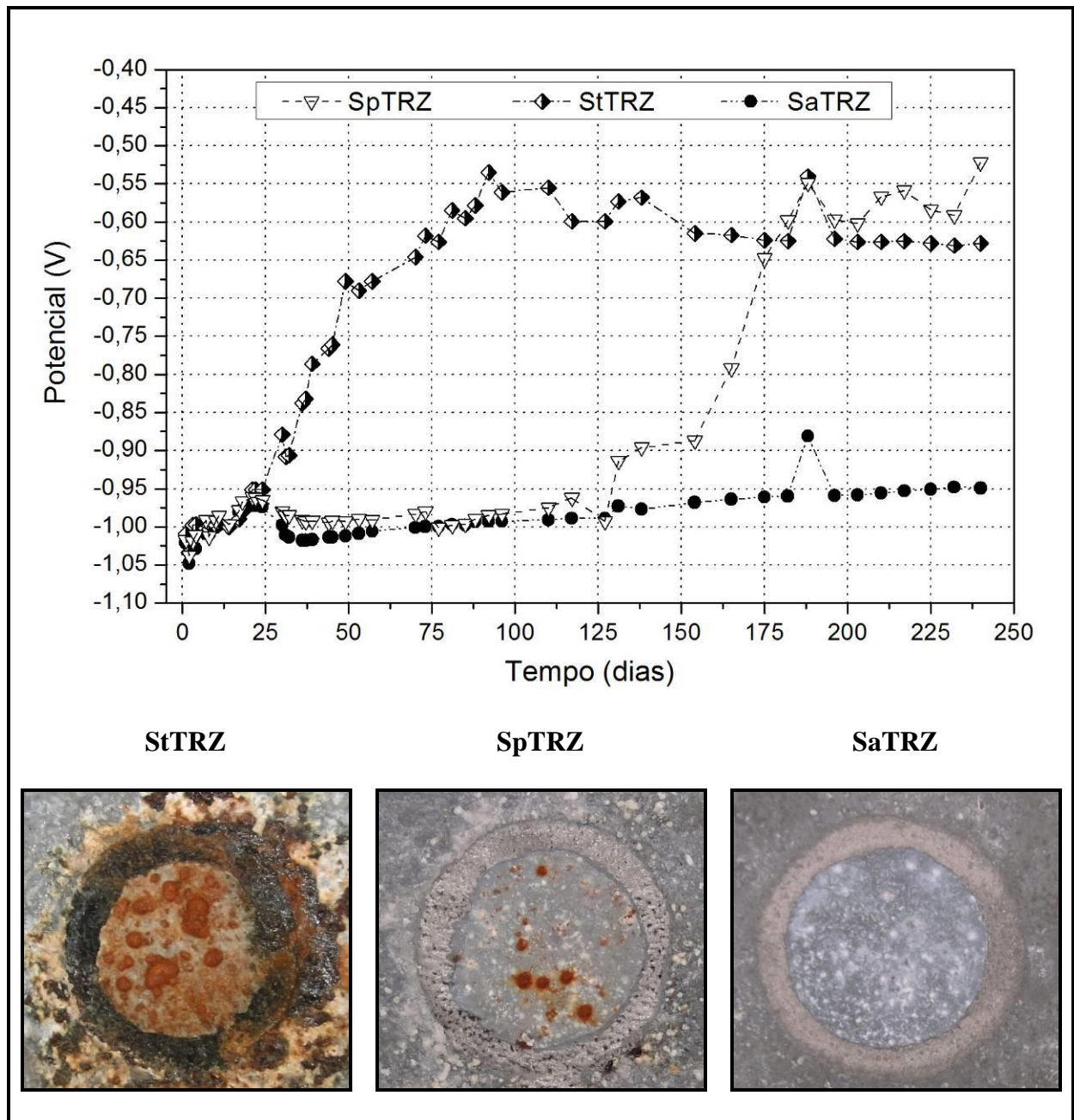


Figura 2 – Medidas de potencial de circuito aberto versus o tempo em solução de NaCl 3,5% para amostras com diferentes tratamentos de superfície, revestidas com primer rico em zinco. Acompanha aspecto visual das amostras após o final do ensaio. Eletrodo de referência de calomelano saturado.

### Ensaio cíclico de corrosão

Na Figura 3 encontram-se os resultados de desempenho anticorrosivo e aspecto visual dos corpos de prova após 39 ciclos no ensaio de corrosão, totalizando 6.552 horas. A Figura 4 mostra os valores de avanço de corrosão em regiões de incisão para todos os esquemas de

pintura estudados, após 5.040h e 6.552h de ensaio. Não foi observado avanço mensurável de corrosão nos corpos de prova antes de 5.040h de ensaio.

Nas Figuras 3 e 4 observa-se que SaTRZ não apresentou avanço significativo de corrosão em torno da incisão. Esse resultado está em concordância com os ensaios eletroquímicos já discutidos. Este esquema de pintura mostrou excelente desempenho anticorrosivo durante todo o tempo de ensaio. Houve apenas perda de cor e brilho da tinta de acabamento, fato natural para este tipo de ensaio cíclico envolvendo exposição à radiação UV.

As amostras StTRZ e SpTRZ apresentaram inicialmente valores próximos para o avanço de corrosão ao redor da incisão: após 5.040h (30 ciclos), 3,35 mm e 3,54 mm, respectivamente (Figura 4). Estes avanços foram aumentando ao logo do ensaio, denunciando falha da TRZ na proteção do aço. Neste aspecto, destaca-se a maior velocidade de avanço da corrosão sob o revestimento para a amostra SpTRZ, saindo de 3,35 mm para 6,04 mm, um aumento de 80%, decorridas 1.512h de ensaio adicionais. Nas mesmas condições, houve um crescimento de apenas 32% na amostra StTRZ. O maior avanço de corrosão em áreas de incisão para aço com tratamento SP11 já foi reportado na literatura para esquemas de pintura com mecanismo de proteção por barreira (2, 7). Neste trabalho, se verifica o mesmo comportamento para esquema com mecanismo de proteção catódica.

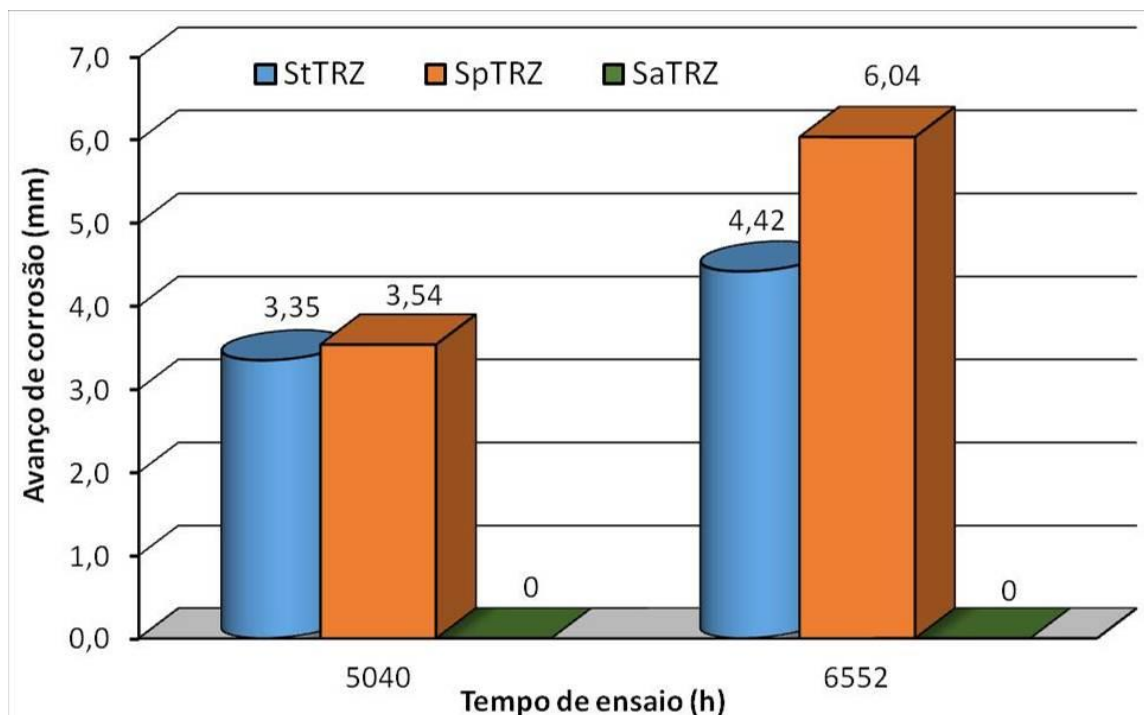


Figura 3 – Avanço de corrosão sob o revestimento na região da incisão durante o ensaio cíclico de corrosão.





Figura 4 – Aspecto visual representativo dos corpos de prova com incisão, antes e após ensaio cíclico de corrosão atmosférica.

As medidas de aderência, referentes às condições inicial e final, para cada um dos esquemas de pintura estudados, estão mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Resultados de aderência de cada esquema de pintura antes e após o ensaio cíclico de corrosão.**

Amostra	Inicial		Final	
	Tensão de ruptura (MPa)	Natureza da Falha	Tensão de ruptura (MPa)	Natureza da Falha
SaTRZ	11,4 ± 1,2	100% coesiva B	6,3 ± 0,9	100% coesiva B
SpTRZ	9,6 ± 2,1	100% coesiva B	8,4 ± 2,4	100% coesiva B
StTRZ	10,5 ± 0,8	70% coesiva B 30% adesiva A/B	6,9 ± 1,1	80% coesiva B 20% adesiva A/B

Na Tabela 2, os valores de aderências iniciais e a natureza das falhas indicam que todos os esquemas de pintura se comportaram de maneira muito similar, com maior porcentagem de falha coesiva “B” da TRZ (tinta de fundo) e com valores de tensão de ruptura em torno de 10 MPa. Este tipo de comportamento é característico de esquemas de pintura contendo TRZ (14), devido à baixa coesão das partículas de zinco. Após o ensaio, as tensões de ruptura diminuíram, mas não existe diferença significativa no valor entre os três esquemas. Quanto ao tipo de falha, o esquema StTRZ foi o único que apresentou porcentagem de falha adesiva “A/B”, justificável pela camada de óxido residual no substrato, típica do tratamento St3.

Portanto, esses resultados de desempenho mostram que o tratamento SP11 é superior ao St3 na medida em que proporciona maior tempo de vida útil ao esquema de pintura com TRZ e propriedades de aderência que mais se aproximam do tratamento Sa3, sendo este último o esquema tido como referência. No entanto, o tratamento SP11 mais uma vez se mostra menos eficiente do que St3 na contenção de corrosão em torno de áreas danificadas do revestimento com exposição do metal. Essa realmente é uma limitação desse tratamento de superfície que precisa ser considerada em especificações para obras de manutenção, pois exige controle de qualidade mais rigoroso de falhas de aplicação, assim como, maior cuidado com a pintura de cantos e arestas.

Essa característica do tratamento SP11 ainda carece de justificativa. O desempenho anticorrosivo dos corpos de prova no ensaio cíclico indicou um avanço maior de corrosão em torno da incisão para amostra SpTRZ, mesmo ela apresentando limpeza da superfície e aderência superiores a amostra StTRZ. Nesse contexto, tornou-se necessário investigar um pouco mais o motivo pela qual o tratamento SP11 é inferior ao St3 no controle do avanço de corrosão em áreas danificadas do revestimento. Para isso foi utilizada a técnica de SVET que é muito adequada para averiguação de atividade eletroquímica superficial.

### **Atividade eletroquímica superficial com SVET**

As amostras que foram utilizadas para o ensaio de SVET foram riscadas com o mesmo buril utilizado para riscar os revestimentos, com o objetivo de avaliar a atividade eletroquímica em torno da região riscada. A área exposta dos corpos de prova à solução de NaCl 0,01 mol/L foi isolada com a aplicação de esmalte incolor. Na Figura 5 pode-se observar os mapas de SVET obtidos ao longo do tempo para a região delimitada, entre os riscos, da amostra “Sp”. Os mapas utilizam escalas de cores para graduar a atividade eletroquímica e classificar as áreas anódicas e catódicas. As cores amarela, laranja e vermelha indicam atividade anódica crescente. As cores verde e azul indicam atividade catódica.

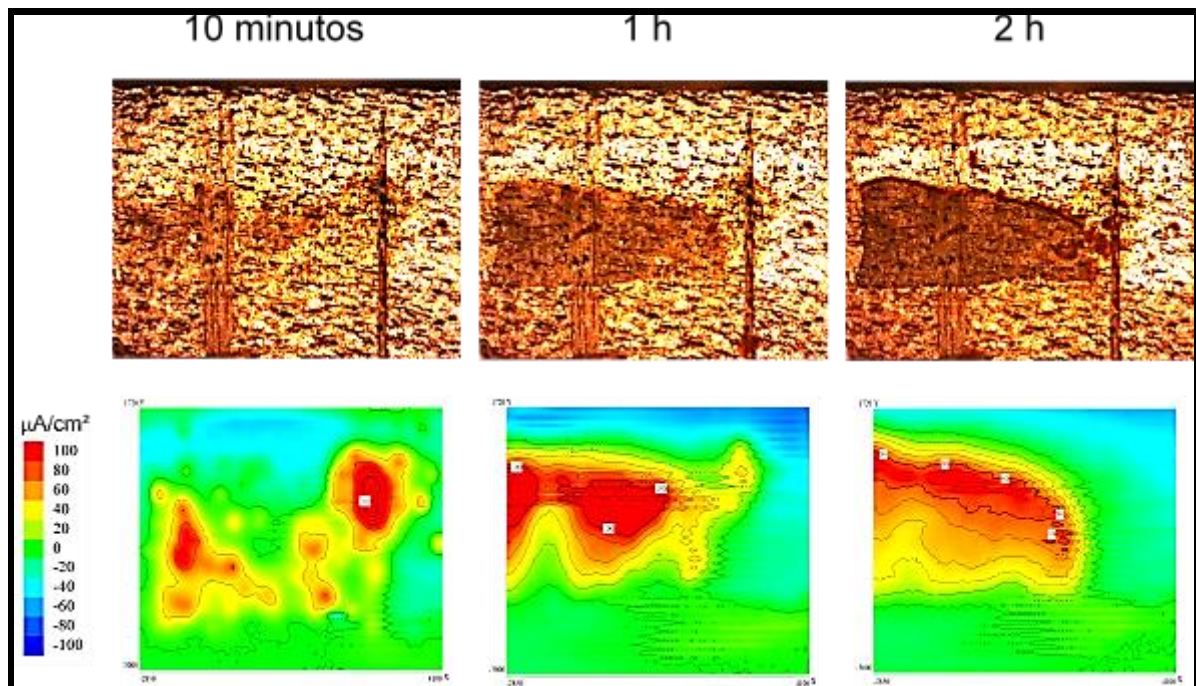


Figura 5 – Mapas de SVET obtidos ao longo do tempo para a região delimitada da amostra “Sp”.

A Figura 5 mostra que “Sp” apresenta grande atividade eletroquímica na maior parte da área analisada onde foram feitos dois riscos. Contudo, não se vê com clareza a concentração de atividade anódica nos riscos. Existem regiões (ilhas) com correntes anódicas elevadas, maiores que  $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  a partir de 10 minutos de ensaio. Essas áreas tendem a se expandir até 2h após a imersão do corpo de prova no eletrólito. O mesmo não ocorre com as amostras “St” e “Sa”, conforme mostram as Figuras 6 e 7, respectivamente. Nessas figuras, aos 10 minutos de imersão, as áreas anódicas de maior atividade eletroquímica se concentram nos riscos que são claramente observados no início do ensaio. Porém, com o passar do tempo essa atividade tende a diminuir, ao contrário do que ocorre com “Sp”.

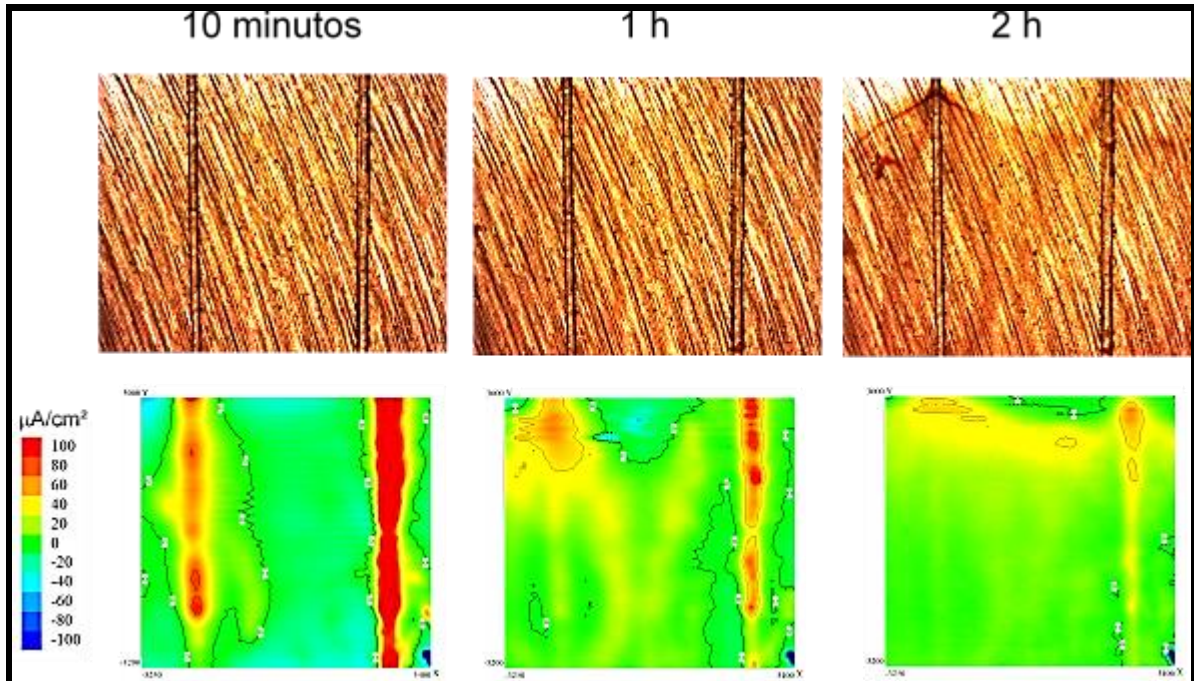


Figura 6 – Mapas de SVET obtidos ao longo do tempo para a região delimitada da amostra “St”.

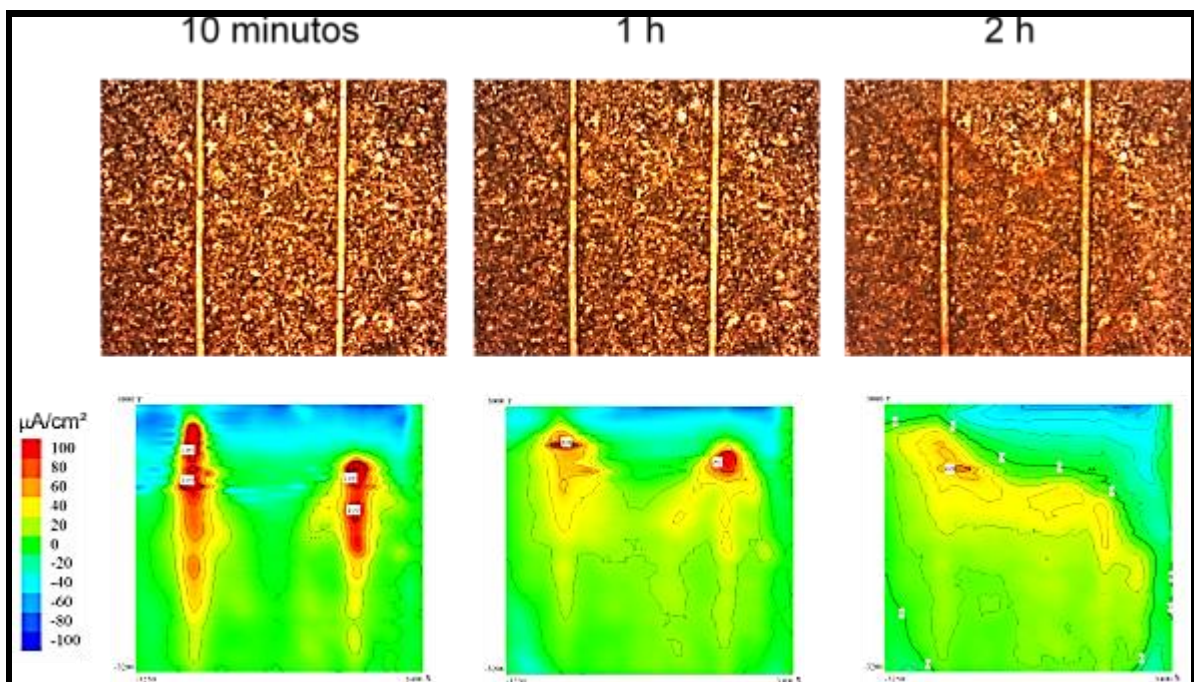


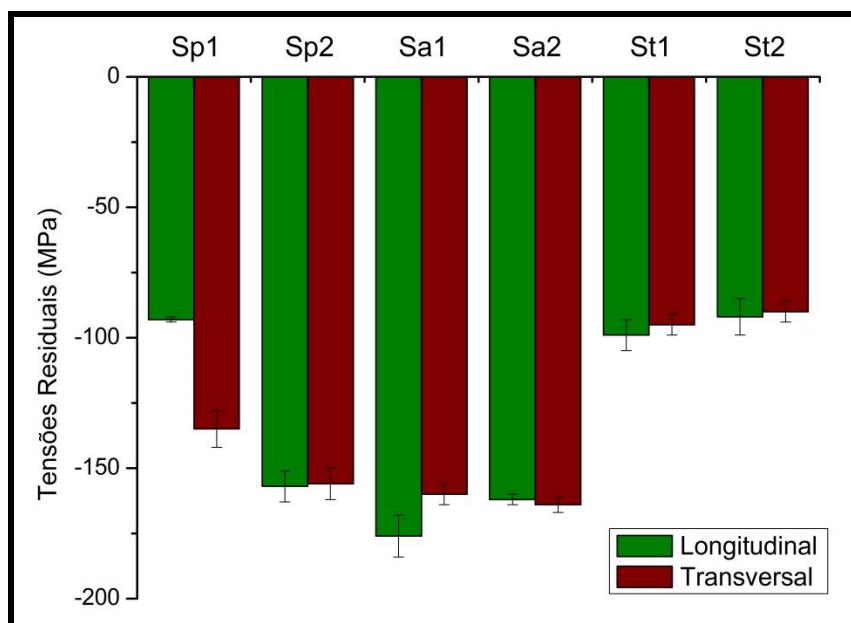
Figura 7 – Mapas de SVET obtidos ao longo do tempo para a região delimitada da amostra “Sa”.

Em resumo, o comportamento eletroquímico das amostras na região riscada é distinto, as amostras “Sa” e “St” possuem comportamento eletroquímico similar com concentração de atividade anódica em torno do risco. Neste caso, presença do risco em um corpo de prova pintado pode acelerar o processo corrosivo do substrato, devido à grande atividade eletroquímica anódica concentrada na região riscada. O comportamento da amostra “Sp” é diferente das demais amostras, com atividade anódica pronunciada também fora da região

riscada. Neste caso, as condições superficiais provocadas pela ferramenta mecânico-rotatória se assemelham aos efeitos do risco, como acontece nos outros tratamentos de superfície. A ferramenta mecânico-rotatória possui cerdas metálicas com composição ligeiramente diferente do aço base e sofre intenso desgaste durante o processo de limpeza da superfície. Sendo assim, é possível que ocorra incrustação do material das cerdas na superfície do aço gerando micropilhas que atuariam a corrosão. Outra hipótese é que haja diferença no nível de tensão residual superficial remanescente de cada tratamento.

### **Análise de tensometria por difração de raios-X**

A Figura 8 apresenta os resultados das tensões residuais superficiais geradas pelos diferentes tratamentos de limpeza.



**Figura 8: Tensões residuais superficiais geradas pelos diferentes tratamentos de limpeza. Amostras em duplicata.**

Analisando a Figura 8, é possível perceber que todas as amostras apresentaram tensões residuais superficiais compressivas, sendo que o jateamento abrasivo (amostras Sa1 e Sa2) gerou tensões residuais compressivas de maior magnitude (cerca de -170 MPa) em ambas as direções analisadas. A limpeza com lixadeira elétrica (amostras St1 e St2) gerou os menores valores de tensões compressivas (cerca de -100 MPa), entretanto, as tensões se apresentaram bastante homogêneas em ambas as direções e nas duas amostras analisadas. A limpeza realizada por ferramenta mecânico-rotativa (amostras Sp1 e Sp2) produziu tensões heterogêneas nas amostras, sendo que em uma amostra as tensões foram semelhantes ao jateamento por granalha e na outra ao lixamento com lixadeira elétrica. Em geral, tensões compressivas não são associadas a estímulo de corrosão. Assim, as diferenças nos valores medidos para Sa e St são sem significado. Por outro lado, se sabe que heterogeneidades macro ou microestruturais são estimuladoras de corrosão. Heterogeneidades só foram detectadas nas amostras Sp.

## Conclusões

---

As vantagens do tratamento SP11 em comparação com St3 foram evidenciadas para a aderência e vida útil de esquema de pintura com tinta de fundo rica em zinco. No entanto, de forma coerente com resultados anteriores obtidos para esquemas com mecanismo de proteção por barreira, foi detectado avanço de corrosão mais importante em torno de incisão no revestimento das amostras com tratamento SP11.

Diretamente relacionada com esse maior avanço, está a maior atividade anódica da superfície SP11 detectada por técnica de varredura com eletrodo vibratório. Um aspecto que pode explicar esse comportamento é a heterogeneidade na tensão superficial residual que só foi detectada para SP11, não sendo observada em amostras jateadas, nem em amostras com tratamento St3. Uma hipótese que, ainda necessita de comprovação experimental, é que devido ao grande desgaste que sofreu a ferramenta mecânico-rotatória utilizada neste trabalho, incrustações com material metálico da escova rotatória no aço base possam estar contribuindo para a ativação eletroquímica da superfície.

A capacidade de conter o avanço de corrosão é muito importante para qualquer esquema de pintura. Essa realmente é uma limitação do tratamento de superfície SP11, que precisa ser considerada em especificações para obras de manutenção, pois exige controle de qualidade mais rigoroso de falhas de aplicação, assim como, maior cuidado com a pintura de cantos e arestas.

## Agradecimentos

---

Agradecimentos ao CNPq pela bolsa PIBIC-EM e à Edilea Andrade Silva pelo suporte técnico na execução deste trabalho.

## Referências bibliográficas

---

1. Pierre R. Roberge. Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 1999.
2. Jorge F. R. Pontes, Alberto P. Ordine, Cristina da C. Amorim, Elber V. Bendinelli, Marcos M. de Sá. Eficiência da limpeza por meio de ferramentas mecânicas na preparação de superfície em serviços de pintura anticorrosiva no setor elétrico. 14ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ), Rio de Janeiro, 2017.
3. Cristina C. Amorim, Yuri H. P. Café, Alberto P. Ordine, Marcos M. Sá, Tatiane S. Moura, Efeito da Preparação de Superfície de Aço Carbono na Formação de Produtos de Corrosão sob Tinta Epoxi, 13ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ), Cabo de Santo Agostinho, 2015.
4. Cristina C. Amorim, Yuri H. P. Café, Alberto P. Ordine, Marcos M. Sá, Tatiane S. Moura, Fernando L. Fragata. Efeito de tintas de fundo ricas em zinco no desempenho anticorrosivo de esquemas de pintura aplicados em chapas de aço-carbono oxidadas

---

preparadas por ferramentas mecânicas. Congresso Internacional de Corrosão (InterCorr) Fortaleza, 2014.

5. ISO 8501-1:2007, Preparation of Steel Substrates before Application of Paints and Related Products - Visual Assessment of Surface Cleanliness - Part 1: Rust Grades and Preparation Grades of Uncoated Steel Substrates and of Steel Substrates after Overall Removal of Previous Coatings.

6. SSPC-SP11, The Society for Protective Coatings Surface Preparation Standard No. 11. Power-Tool Cleaning to Bare Metal, 2012.

7. Isabela Mendes A. Silva, Isabel Cristina P. Margarit-Mattos, Elber V. Bendinelli, Marcos M. de Sá, Alberto P. Ordine. Estudo comparativo de tratamentos de superfície. 14ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ), Rio de Janeiro, 2017.

8. ISO 9223, Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification, Determination and Estimation, 2012.

9. ABNT NBR 13797, Água - Determinação de cloretos - Métodos titulométricos do nitrato mercúrico e do nitrato de prata, 1997.

10. ISO 4628-8 - Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance — Part 8: Assessment of degree of delamination and corrosion around a scribe, 2005.

11. ASTM B117, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, 2016.

12. ASTM D4541, Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, 2009.

13. Fernando L. Fragata, Alberto P. Ordine. Desempenho anticorrosivo de esquemas de pintura com tintas primárias em pó pigmentadas com zinco. Corrosão e Proteção de Materiais, vol. 28, Nº 2, 2009.