

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 bórax como inibidor de corrosão para uso em água de hidrojetamento**

Jorge Felipe Ramos Pontes<sup>a</sup>, Elber Vidigal Bendinelli<sup>b</sup>, Cristina da Costa Amorim<sup>c</sup>,  
Alberto Pires Ordine<sup>d</sup>

### **Abstract**

Since 2014 Cepel and Eletrobras are working to elaborate and review their technical standards for anticorrosive painting services, in order to establish requirements for procedures and materials to be employed in the anticorrosive protection of metallic structures and electric equipments. In those standards, the use of corrosion inhibitors in the water for the waterjetting process is an issue to define. Corrosion inhibitors are used to retard the formation of flash rust on the surface, but residues of these materials in the surface may become contaminants, as they are usually soluble salts. Due to the presence of these salts, premature failures of the paint system may be observed. So, this work presents results of an investigation about the effect of sodium tetraborate (borax), as a corrosion inhibitor used during waterjetting, in the anticorrosive performance of a paint system. Mass loss tests and electrochemical tests (polarization techniques and electrochemical impedance), using different inhibitor contents were carried out to characterize its effect. Also, the anticorrosive performance of a paint system was evaluated in a humidity condensation chamber, with and without the use of the inhibitor, during the surface preparation step.

**Keywords:** corrosion inhibitor, borax, waterjetting, maintenance.

### **Resumo**

Desde 2014, o Cepel em conjunto com as empresas Eletrobras vêm trabalhando na elaboração e revisão de normas técnicas de pintura anticorrosiva da Eletrobras, para padronizar procedimentos e materiais a serem utilizados na proteção anticorrosiva de estruturas metálicas e equipamentos elétricos. Entre tais procedimentos, o uso de inibidores de corrosão na água de hidrojetamento, durante a etapa de preparação de superfície, era uma questão sem consenso. Os inibidores retardam a oxidação instantânea após o hidrojetamento, mas podem tornar-se contaminantes ao ficarem retidos na superfície. São, geralmente, sais solúveis podendo, assim, ocasionar falhas prematuras no revestimento. Este trabalho apresenta resultados de avaliação do efeito do inibidor tetraborato de sódio (bórax), utilizado na etapa de hidrojetamento, no desempenho anticorrosivo de um esquema de pintura. Foram realizados ensaios de perda de massa e ensaios eletroquímicos (curvas de polarização e impedância eletroquímica), com diferentes teores do inibidor, para caracterização do seu desempenho anticorrosivo. Além disso, avaliou-se o desempenho anticorrosivo de um esquema de pintura aplicado, em câmara de condensação de umidade, com e sem inibidor na etapa de preparação de superfície.

**Palavras-chave:** inibidor de corrosão, bórax, hidrojetamento, manutenção.

<sup>a</sup> Graduando - Engenharia Química - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

<sup>b</sup> M. Sc. - Engenheiro Químico - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

<sup>c</sup> M. Sc. - Química Industrial - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

<sup>d</sup> D. Sc. - Engenheiro Químico - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

## Introdução

---

O sistema elétrico brasileiro possui cerca de 103 mil quilômetros de linhas de transmissão no país, dos quais aproximadamente 63 mil quilômetros têm mais de 15 anos de operação. Os outros 40 mil quilômetros foram construídos depois de 1997, segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (1). Para garantir o fornecimento de energia elétrica no país, torna-se necessária a constante manutenção das torres e linhas de transmissão. Existem vários métodos de preparação de superfícies indicados para a pintura de estruturas metálicas, tais como: utilização de ferramentas manuais e mecânicas (2), jateamento abrasivo úmido (3) e hidrojateamento (3).

A técnica de hidrojateamento tem sido utilizada pelas empresas do setor elétrico na manutenção de grelhas de torres enterradas devido à grande eficiência dessa técnica na retirada de óxidos e produtos de corrosão. Além disso, a mesma promove a remoção eficiente de sais solúveis que podem estar presentes na superfície metálica. Entretanto, a água remanescente na superfície, após o hidrojateamento, causa o aparecimento instantâneo de uma fina camada de ferrugem, conhecida como *flash rust*. Inibidores de corrosão podem ser adicionados na água de hidrojateamento para evitar o aparecimento desta oxidação instantânea e permitir aumentar o intervalo de tempo entre a realização do hidrojateamento e a aplicação do esquema de pintura subsequente. Ocorre que, a presença de substâncias higroscópicas na superfície metálica, antes do processo de pintura, pode causar falhas prematuras no esquema aplicado (4).

Sendo assim, este trabalho estudou o desempenho do tetraborato de sódio (bórax) como inibidor de corrosão para aço carbono e zinco. Além disso, estudou-se a influência deste inibidor sob o revestimento anticorrosivo aplicado. O bórax foi escolhido para ser testado, pois o mesmo vem sendo utilizado em trabalhos de campo por empresas que realizam serviços de hidrojateamento no setor elétrico. Inibidores a base de borato são conhecidos na literatura como inibidores do tipo anódicos e apresentam bom desempenho anticorrosivo em substratos como aço carbono, zinco, cobre, e suas respectivas ligas (5).

Diversos ensaios foram realizados para verificar se o uso desse inibidor na água de hidrojateamento é aconselhável ou não, com o objetivo de proteger uma superfície metálica, evitando a oxidação instantânea, uma vez que, a presença desse mesmo sal pode também afetar o desempenho do revestimento anticorrosivo aplicado.

## Metodologia

---

A seguir, descrevem-se os ensaios de caracterização realizados.

### 3.1 Materiais

Os materiais metálicos utilizados como substratos foram chapas de aço carbono 1020 e zinco, com dimensões de 150 mm x 100 mm e espessura de 6 mm, para os ensaios na câmara de condensação de umidade; e de 50 mm x 100 mm para os ensaios de perda de massa. Os corpos de prova foram submetidos a um tratamento de superfície que consistiu no jateamento abrasivo e desengraxe com metil etil cetona (MEK). Os corpos de prova utilizados no ensaio de perda de massa são mostrados na Figura 1.

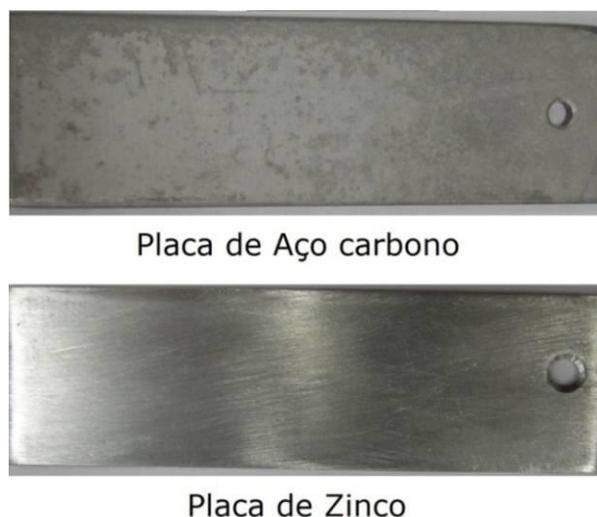


Figura 1 - Placas de aço carbono e zinco antes do ensaio de perda de massa.

### 3.2. Ensaio de perda de massa

Os corpos de prova de aço carbono e zinco foram imersos em soluções de cloreto de sódio (NaCl 3,5%) contendo vários teores de bórax (0,25, 0,5, 1, 2,5 e 5% (v/v)). Tais teores contemplam a faixa de concentração do inibidor que costuma ser adicionada na água, no processo de hidrojateamento. O tempo total de ensaio foi de 7 dias, sendo que foram feitas triplicatas para avaliar a reprodutibilidade dos resultados. Após essa etapa, foi realizado o processo de decapagem do substrato, conforme a norma NBR 6210 (6), para a retirada dos produtos de corrosão e cálculo da velocidade de corrosão. Os corpos de prova submetidos a este ensaio podem ser observados na Figura 2.



Figura 2 - Placas de aço carbono (à direita) e zinco (à esquerda), imersas em solução de NaCl 3,5%, para o ensaio de perda de massa.

### 3.3. Polarização anódica e catódica

O ensaio consistiu no levantamento de curvas de polarização, variando-se o potencial em 100 mV a partir do potencial de circuito aberto, no sentido catódico e anódico, obtido após 1 h de imersão nas referidas soluções. A velocidade de varredura foi de 0,1 mV/s e o eletrodo

de aço carbono possuía 3,19 cm<sup>2</sup> de área útil. O equipamento utilizado para os ensaios foi um potenciostato Autolab PGSTAT302N associado ao software Nova. Como meio de estudo foi utilizado solução de NaCl 3,5%: sem adição de inibidor (branco) ou contendo de 0,25 % a 5% (v/v) de bórax.

### 3.4. Câmara de condensação de umidade

Antes do início do ensaio de condensação de umidade, os corpos de prova foram preparados, em duplicata, sob 3 (três) condições:

1. Seca – onde se realizou somente o jateamento abrasivo seco da placa, obtendo-se grau de limpeza Sa 2½;
2. Úmida – onde se realizou aplicação de água destilada após o jateamento abrasivo seco, para simular o *flash rust* grau leve;
3. Contaminada – com aplicação de solução de bórax, nas concentrações de 1 e 5% (v/v), sobre a superfície, após jateamento abrasivo seco.

Em seguida, em todos os casos, foram aplicadas duas demãos de tinta epóxi (N-1198) sobre as superfícies, conforme mostra a Tabela 1. Após a cura completa da tinta, os corpos de prova foram expostos em câmara de condensação de umidade. A duração total do ensaio foi de 744 horas.

Este ensaio foi executado com base na norma ASTM D 4585 (7), nas condições de  $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$  e  $(99 \pm 1)\%$  de umidade relativa, e caracteriza-se pela condensação contínua de vapor d'água na superfície revestida, devido à diferença de temperatura entre o interior da câmara e o ambiente externo. A Figura 3 mostra a câmara utilizada.

**Tabela 1 - Descrição das condições ensaiadas.**

Esquema	Substrato [Tratamento de superfície]	Condição sob o revestimento	Esquema de pintura
AD	Aço carbono [Jateamento abrasivo Sa 2½]	Seca	2 demãos de tinta epóxi
AW		H <sub>2</sub> O destilada	
A1		Solução de Bórax 1%	
A5		Solução de Bórax 5%	
ZD	Aço galvanizado [Lixamento com lixa 600]	Seca	
ZW		H <sub>2</sub> O destilada	
Z1		Solução de Bórax 1%	
Z5		Solução de Bórax 5%	



Figura 3 - Câmara de condensação de umidade, com os corpos de prova revestidos.

### 3.5. Espectroscopia de impedância eletroquímica

Para as medidas de impedância eletroquímica, foi utilizado o mesmo potenciostato das medidas de polarização. Após o término da medida do potencial de corrosão, o ensaio de impedância eletroquímica foi iniciado com uma varredura de frequência de 40.000 Hz até 4 mHz, atingindo um número de 50 ciclos. A amplitude da perturbação utilizada foi 0,15 V para substrato revestido e 0,10 V para os substratos sem revestimento, o tempo de integração máximo foi de 0,2 s.

## Resultados e Discussão

Com base na metodologia acima, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada ensaio.

### 4.1. Ensaio de perda de massa

O ensaio de perda de massa foi utilizado para avaliar a taxa de corrosão de aço carbono e de zinco em soluções com diferentes concentrações do bórax na solução de NaCl 3,5%, com o objetivo de verificar a eficiência do inibidor de corrosão.

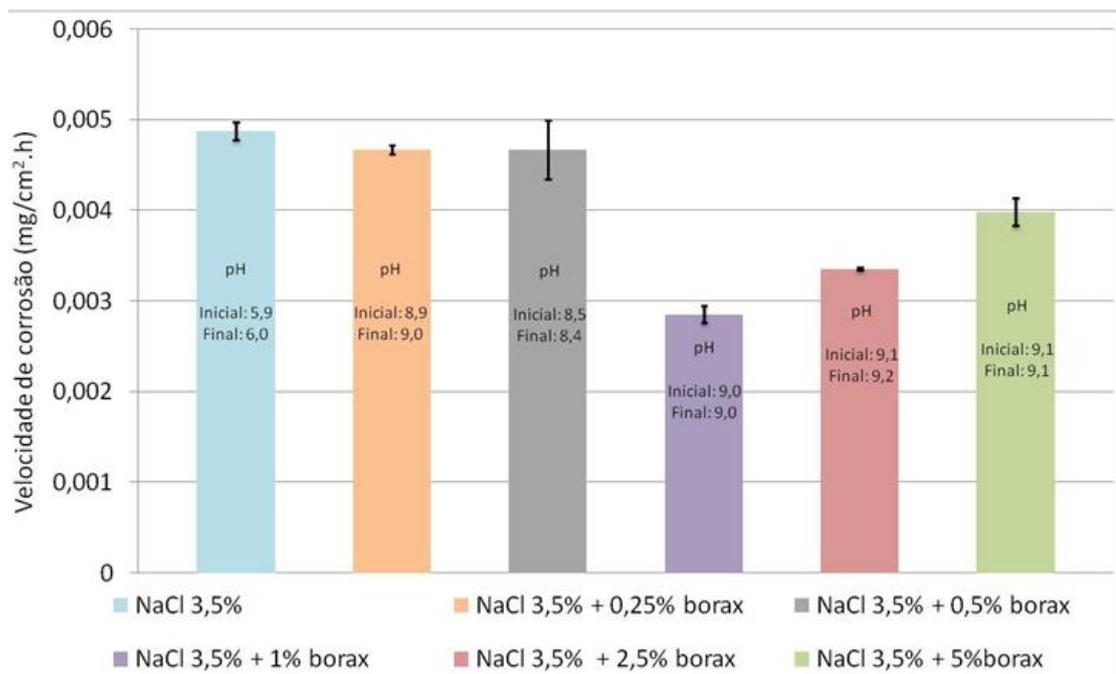
#### 4.1.1. Aço carbono

A Figura 4 mostra o aspecto visual do corpo de prova de aço carbono depois do ensaio de perda de massa, onde a corrosão é generalizada. Esse aspecto foi equivalente para todas as concentrações de bórax estudadas.



**Figura 4 - Placa de aço carbono submetida ao ensaio de em perda de massa com presença de bórax, na concentração de 1%.**

Na Figura 5, é possível observar a influência da concentração de bórax na velocidade de corrosão do aço carbono. As barras de erro mostram o desvio-padrão para o conjunto de amostras utilizadas. Quando se adiciona uma pequena quantidade de bórax no meio (0,25 e 0,5%), a redução da velocidade de corrosão não é significativa comparada com a solução de NaCl 3,5%. Sendo assim, nestas concentrações, o bórax não teve um desempenho eficiente como inibidor. Quando a concentração de bórax foi igual a 1%, a velocidade de corrosão caiu consideravelmente, promovendo uma redução de aproximadamente 45% na velocidade de corrosão comparada com a solução de NaCl 3,5%. Entretanto, a medida que acrescentou-se mais bórax ao meio, a velocidade de corrosão aumentou, o que não é muito comum de acontecer. Este fato pode estar relacionado com a própria natureza do bórax, que é uma substância oxidante e o aumento excessivo da sua concentração no meio acelera a corrosão do aço.

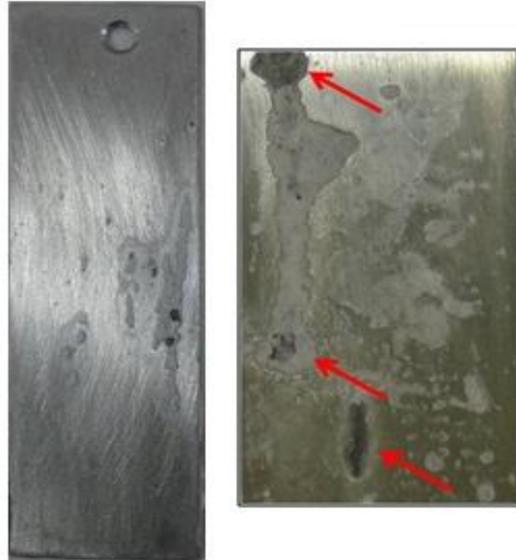


**Figura 5 - Velocidade de corrosão do aço carbono em diferentes concentrações de bórax.**

Nesse contexto, torna-se extremamente perigosa a utilização de um inibidor de corrosão cuja eficiência máxima esteja atrelada a uma concentração ótima, no caso 1% para o bórax, sendo que no caso do hidrojateamento a céu aberto não é possível ter um controle efetivo da concentração do sal na superfície do aço. Esse controle só pode ser realizado em circuitos fechados com sensores para monitoramento instantâneo da concentração do inibidor no meio, e com mecanismos de ajuste de concentração quando houver variações na mesma.

#### 4.1.2. Zinco

Na Figura 6, é possível observar o aspecto visual dos corpos de prova de zinco depois do ensaio de perda de massa. A placa à esquerda foi ensaiada na presença de 1% de bórax e a placa à direita, de 5% de bórax, e verificou-se que a corrosão foi localizada e avançou em profundidade, em algumas regiões indicadas pelas setas vermelhas.



**Figura 6 - Placas de zinco submetidas ao ensaio de perda de massa com diferentes concentrações de bórax: placa à esquerda, com 1% de bórax e a placa à direita, com 5% de bórax.**

Na Figura 7, pode-se observar a influência da concentração de bórax na taxa de corrosão de zinco. Com baixas concentrações de inibidor, entre 0,25% e 1%, observou-se uma redução efetiva da taxa de corrosão, fato este que não ocorreu com o aço carbono. A concentração ótima de inibição situou-se em 1% para o substrato zinco e, após este valor, a velocidade de corrosão do zinco atingiu um patamar constante, independente da concentração de bórax no meio. Portanto, um acréscimo de bórax não melhorou seu desempenho anticorrosivo. Na prática, este fato somente elevaria os custos de operação em função da utilização de maior quantidade do material.

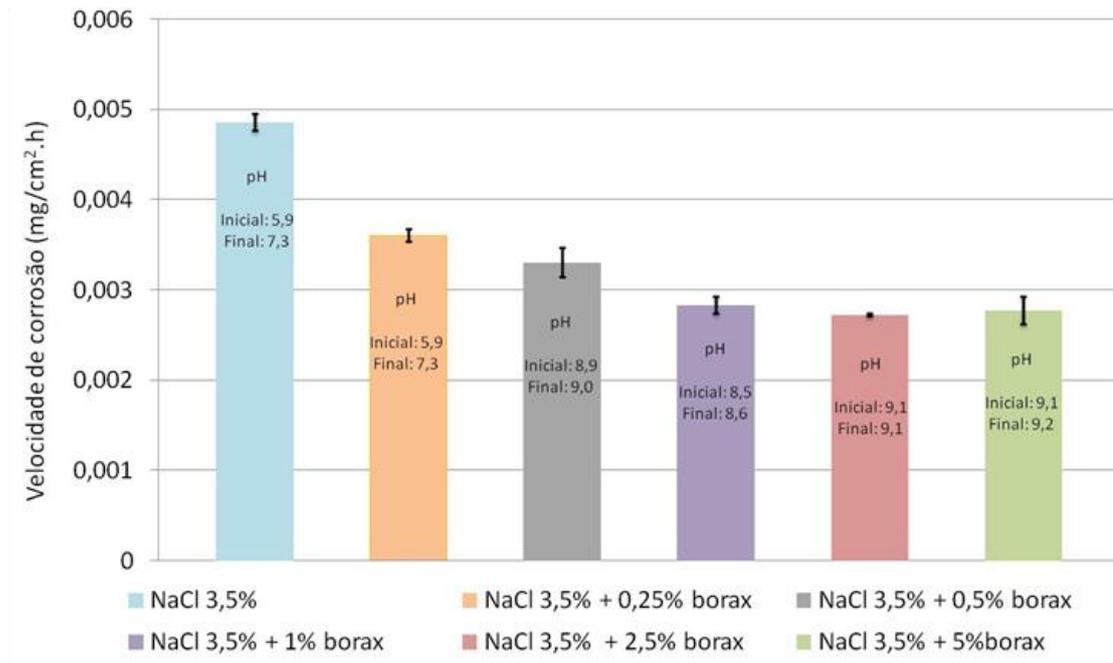


Figura 7- Velocidade de corrosão do zinco em diferentes concentrações de bórax.

A Figura 8 evidencia o comportamento comparativo do bórax como inibidor de corrosão para aço carbono e zinco. Neste gráfico verifica-se que há uma redução da velocidade de corrosão em ambos os casos, mas com atuação diferente.

Em ambos os substratos, o bórax tem uma concentração ótima de inibição, em torno de 1%. Porém, no caso do aço carbono, o aumento da concentração acima da concentração ótima implica no aumento da velocidade de corrosão. Este fato não ocorre para o zinco, ou seja, um aumento da concentração de bórax acima da concentração ótima implica em gasto em excesso de material, sem aumento da proteção anticorrosiva.

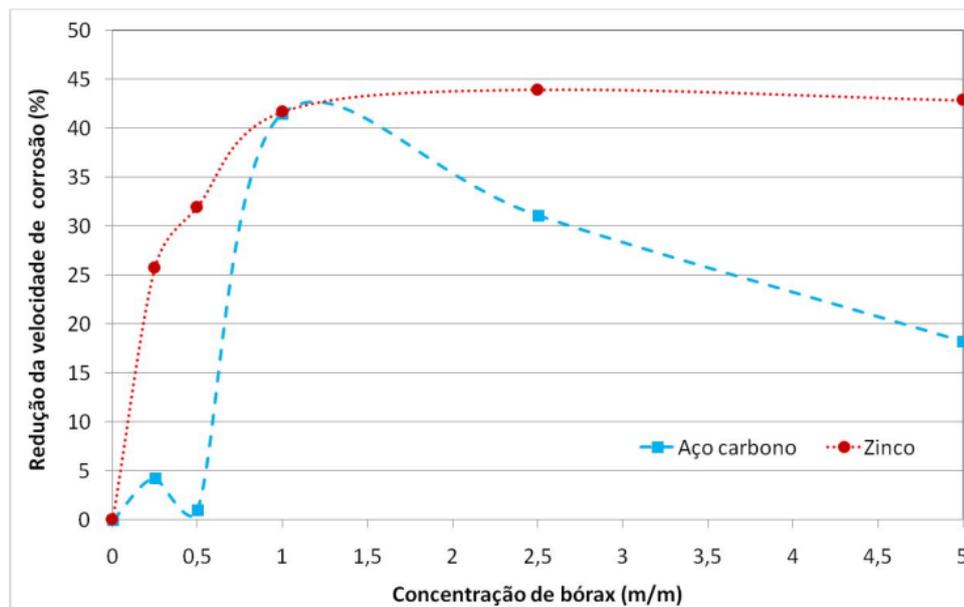


Figura 8 - Curvas comparativas da redução da velocidade de corrosão do zinco e aço carbono para as diferentes concentrações de bórax.

## 4.2. Polarização anódica

Visto que o bórax funcionou como inibidor de corrosão para ambos os substratos no ensaio de perda de massa, tornou-se necessário avaliar qual o seu mecanismo de atuação. Conhecer o mecanismo de atuação de um inibidor de corrosão é muito importante para a sua correta especificação, de acordo com as características do meio corrosivo, uma vez que este deve ser compatível nas condições onde está sendo utilizado.

Na Tabela 2 são mostrados o potencial de circuito aberto e a densidade de corrente, com 10 mV de sobretensão anódica para o aço carbono e o zinco, obtidos em diferentes concentrações de bórax. Nesta Tabela, observa-se que o aumento da concentração do inibidor em ambos os metais provocou um aumento do potencial de circuito aberto (OCP) e reduziu a densidade de corrente para uma pequena sobretensão anódica. Estes fatos indicam que esta substância comporta-se como um inibidor anódico, em concordância com a literatura (2).

A concentração de 1% de bórax para o aço carbono promoveu uma maior redução na densidade de corrente. Essa concentração de bórax também mostrou o melhor desempenho anticorrosivo no ensaio de perda de massa. Em relação ao zinco, o bórax se comportou de maneira semelhante ao aço carbono, promovendo uma redução considerável da densidade de corrente e elevando o potencial de circuito aberto.

**Tabela 2 - Potencial de circuito aberto (OCP) e densidade de corrente com 10 mV de sobretensão anódica, para o aço carbono e zinco, em diferentes teores de bórax.**

Substrato	Meio	Concentração de bórax (v/v)	OCP (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )
Aço carbono	NaCl 3,5%	0	-0,69	6,56E-06
		0,25 %	-0,55	4,56E-06
		0,5 %	-0,51	4,89E-06
		1 %	-0,49	3,11E-06
		2,5 %	-0,43	3,47E-06
		5 %	-0,44	4,56E-06
Zinco	NaCl 3,5%	0	-1,09	7,16E-04
		1 %	-1,01	1,49E-04
		2,5 %	-0,92	1,29E-04
		5 %	-0,97	1,10E-04

Os inibidores anódicos atuam bloqueando a reação anódica, reagindo com o produto de corrosão inicialmente formado e gerando um filme protetor aderente e insolúvel na superfície do metal. Este comportamento pode explicar o que se observou neste ensaio, ou seja, o aumento de potencial para valores maiores, com a queda na densidade de corrente, evidenciando um bloqueio da superfície.

Na Figura 9, é possível observar as curvas de polarização anódicas para o aço carbono com diferentes concentrações de bórax, indicando a clara influência da adição do inibidor nas curvas anódicas, representada pela redução na densidade de corrente ao ser comparada com a curva da solução de NaCl 3,5%.

Ainda na Figura 9, nota-se que as maiores reduções de densidade de corrente foram observadas com as curvas de concentração 1% e 2,5% de bórax, sugerindo o melhor poder de inibição nesta faixa de concentração, o que é coerente com os resultados de perda de massa. Com o aumento do teor de bórax para 5%, houve queda do efeito inibidor, com o deslocamento da curva no sentido de maiores densidades de corrente.

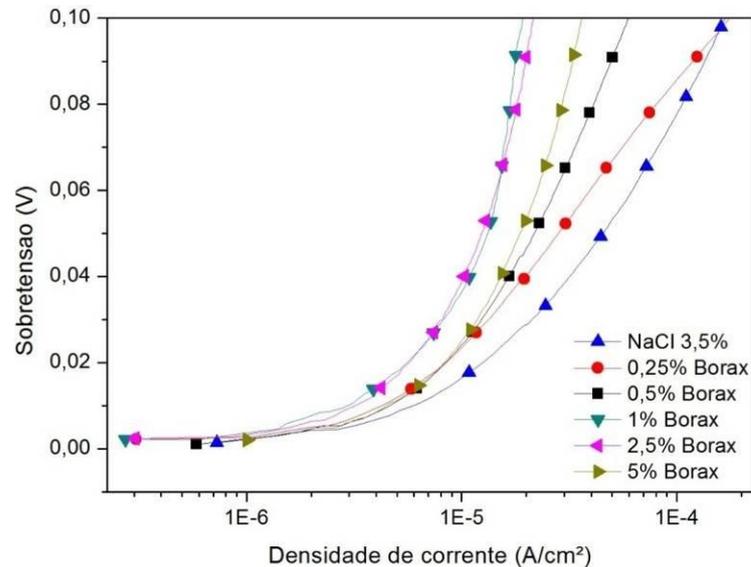


Figura 9 - Curvas anódicas para o aço carbono com diferentes concentrações de bórax.

Na Figura 10, é possível observar que nas curvas anódicas do zinco, assim como no aço carbono, o bórax teve uma atuação anódica sobre o zinco.

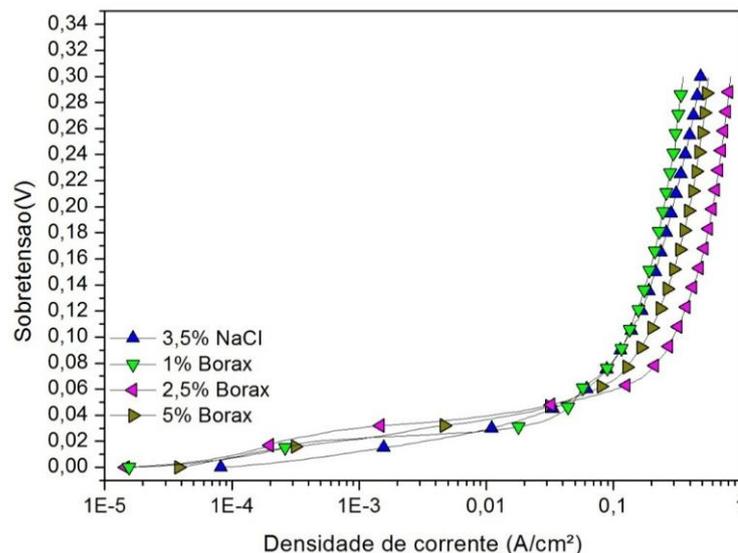


Figura 10 - Curvas anódicas para zinco com diferentes concentrações de bórax.

Por fim, foram obtidas curvas de polarização catódicas, onde observou-se que a concentração de bórax não apresenta influência para o aço carbono e zinco. Esse fato reforça que o bórax não possui mecanismo de inibição catódico.

### 4.3. Câmara de condensação de umidade

Na Figura 11, é possível observar o aspecto dos corpos de prova contaminados com 5% (v/v) de boráx, após 24h de ensaio em câmara de condensação de umidade. Os corpos de prova de ambos substratos (aço carbono e zinco) apresentaram bolhas sob o revestimento. Essas bolhas podem ser classificadas segundo a ISO 4628/2 (7). Para o aço carbono, as bolhas foram classificadas como bolhas 2(S5), onde 2 indica a distribuição das bolhas ao longo de toda a superfície e S5 indica o tamanho das bolhas. Já as placas de aço galvanizado apresentaram bolhas 5(S3).

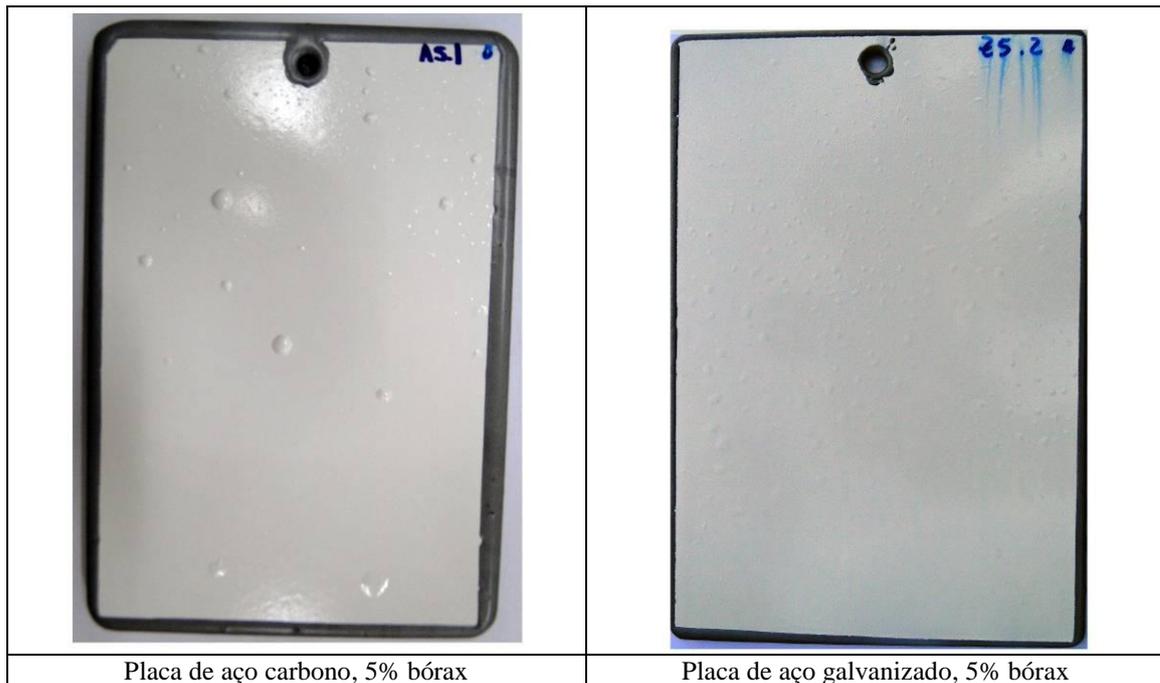


Figura 11 - Corpos de prova ensaiados na câmara de condensação de umidade após 24h de ensaio.

Essa formação de bolhas sob o revestimento está relacionada ao processo osmótico induzido pelo inibidor, devido à diferença de concentração entre o meio externo e interno (superfície metálica). O inibidor salino, por ser higroscópico, favorece a permeação do eletrólito do meio externo para a superfície metálica, neste caso a tinta funcionou como uma membrana semipermeável. A água que permeia o revestimento inicia um processo corrosivo na superfície metálica, gerando produtos de corrosão e bolhas na tinta, o que diminui consideravelmente a capacidade de proteção anticorrosiva do revestimento. Esse processo está esquematizado na Figura 12.

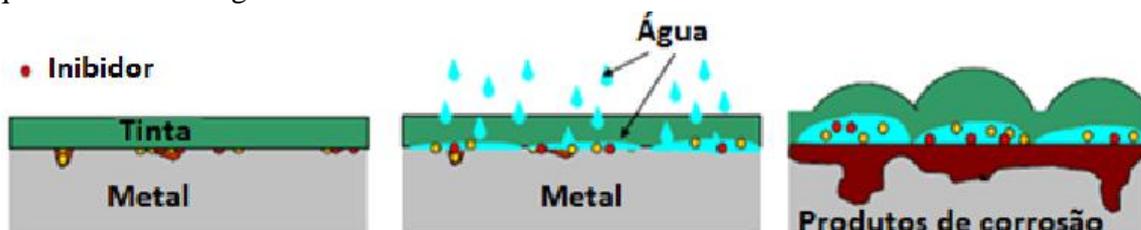


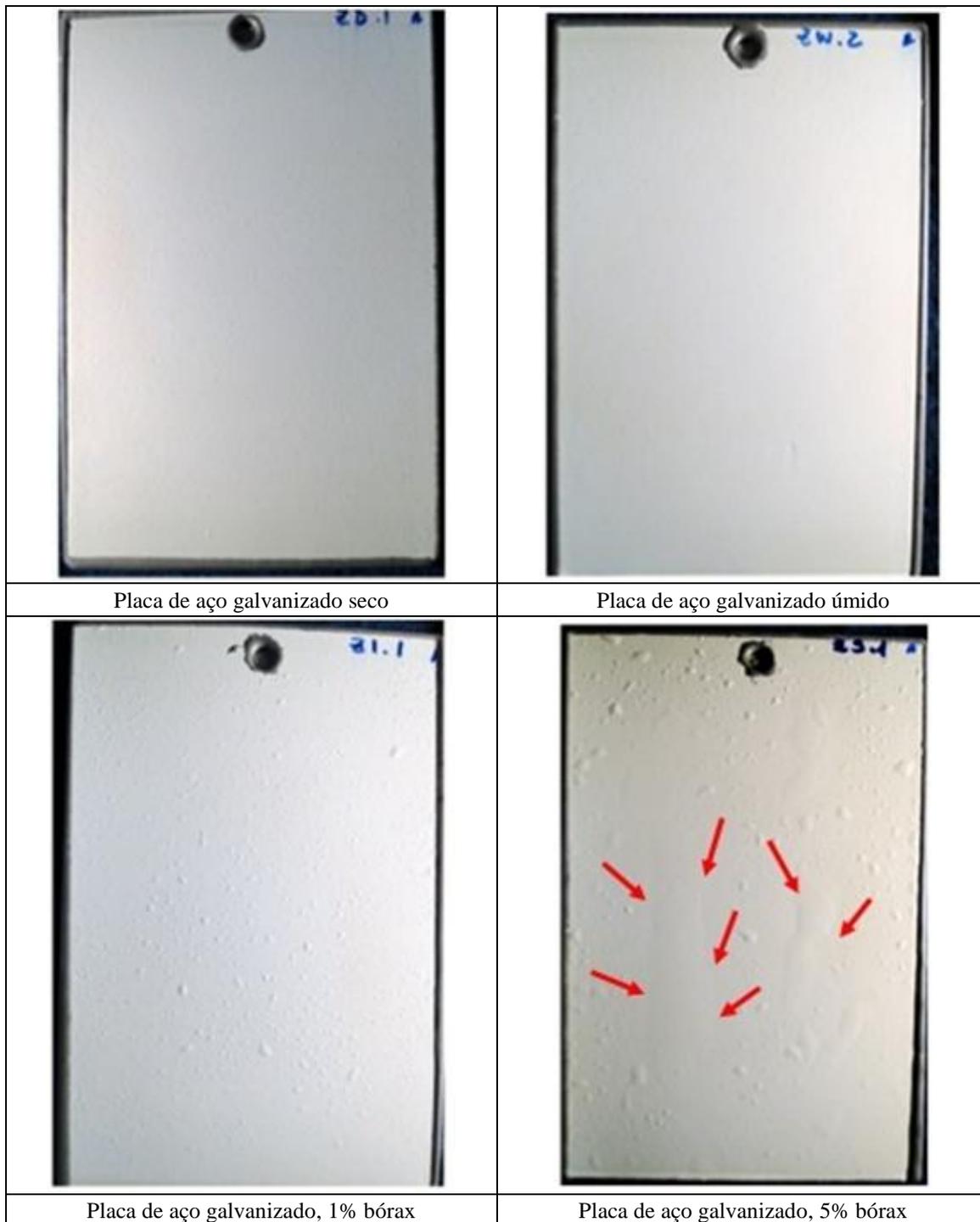
Figura 12 - Processo de permeação da água através do revestimento, gerando empolamento e corrosão.

Na Figura 13, observam-se os corpos de prova ensaiados na câmara de condensação de umidade após 48h de ensaio. Após este tempo, todos os corpos de prova contaminados com bórax apresentaram empolamento no revestimento: as placas de aço carbono, com 1% de bórax apresentaram bolhas com diferentes classificações, 4(S3) e 2(S4), já as placas de aço galvanizado apresentaram bolhas 5(S3), enquanto a condição simulando o “*flash rust*” e aquela somente tratada com jateamento abrasivo seco não apresentaram nenhum defeito no revestimento.



Figura 13 - Corpos de prova ensaiados em câmara de condensação de umidade após 48h de ensaio.

A Figura 14 mostra os corpos de prova de aço galvanizado, após 744h de ensaio em câmara de condensação de umidade.



**Figura 14- Corpos de prova de aço galvanizado, após 744h de ensaio em câmara de condensação de umidade.**

Na Figura 14, observa-se que o substrato de aço galvanizado sofreu uma maior influência do efeito osmótico em relação ao aço carbono, danificando consideravelmente o revestimento protetor. Nesta Figura, é possível notar que somente as placas contaminadas com bórax

apresentaram empolamento. Isso indica que, apesar do inibidor diminuir a velocidade de corrosão na superfície do material metálico, seu efeito sob o revestimento é muito prejudicial, reduzindo consideravelmente a vida útil da camada de tinta protetora.

Na Figura 15, observa-se o aspecto visual dos corpos de prova de aço carbono, com substrato seco e úmido, ensaiados na câmara de condensação de umidade, após 744h de ensaio.



**Figura 15- Placas de aço carbono, seca e úmida, após 744h de ensaio na câmara de condensação de umidade.**

Pode-se observar que o efeito do *flash rust* não é tão prejudicial para o revestimento quanto se esperava, pois o desempenho da tinta sobre o *flash rust* e sobre a superfície jateada a seco foi semelhante, após 744h de ensaio.

Isso demonstra que se a tinta for compatível com o *flash rust* formado, e for aplicada de maneira correta, é mais seguro não utilizar um inibidor de corrosão higroscópico para evitar a formação da oxidação instantânea, pois a presença do inibidor sob o revestimento pode gerar falhas prematuras no revestimento.

#### **4.4. Impedância eletroquímica**

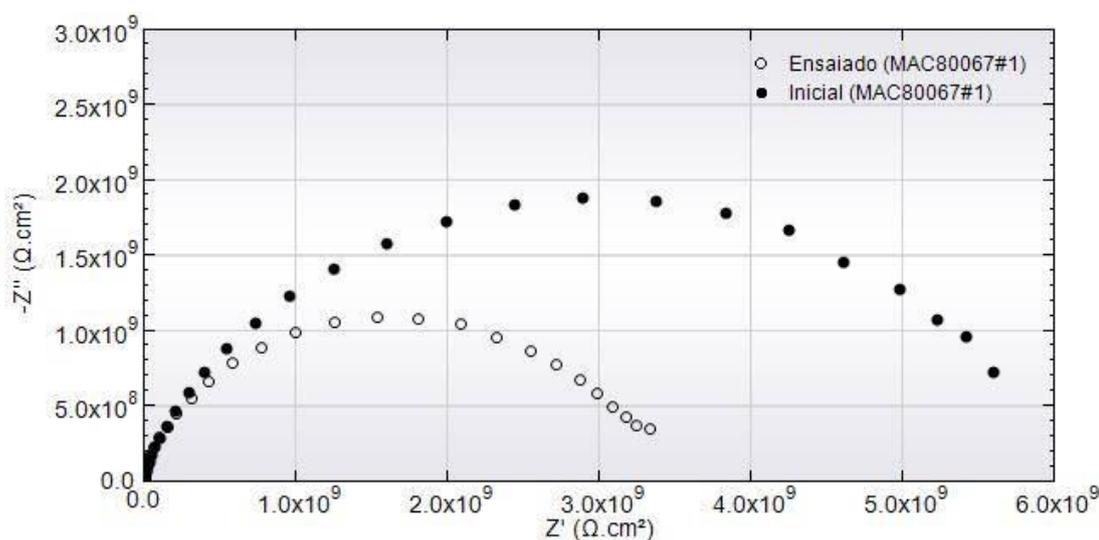
Foram realizados ensaios de impedância eletroquímica para verificar, com o auxílio de outra técnica, a influência do bórax no processo de degradação do revestimento anticorrosivo. O parâmetro utilizado na avaliação foi a queda no valor de impedância inicial do revestimento anticorrosivo, provocado pela permeação do eletrólito através do revestimento, o que promoveu uma perda da propriedade de barreira do revestimento.

Na Tabela 3, encontram-se os dados de resistência de polarização para o aço carbono sem revestimento, após diferentes condições de preparação de superfície e em meios contendo ou não bórax. Estes dados foram extraídos a partir dos diagramas de impedância eletroquímica, no limite de baixa frequência, após 24 horas de imersão nas soluções indicadas. Nesta Tabela, percebe-se que a superfície jateada e aquela com *flash rust* apresentaram a mesma resistência, enquanto que a adição de bórax na solução resultou em um aumento significativo na resistência de polarização, evidenciando o efeito inibidor do bórax nas superfícies. Tal efeito é coerente com a caracterização do bórax como um inibidor anódico pelas curvas de polarização. Destaca-se que a concentração de 1% de bórax, como foi também indicada nos resultados anteriores, apresentou maior efeito inibidor para esse substrato metálico.

**Tabela 3- Resistência de polarização para aço carbono sem revestimento em diferentes meios.**

Preparação de superfície	Solução de ensaio	Resistencia de polarização ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
Jateamento seco	NaCl 3,5%	3480
Jateamento seco + <i>Flash rust</i>	NaCl 3,5%	3480
Jateamento seco	NaCl 3,5% + 1% Bórax	5562
Jateamento seco	NaCl 3,5% + 5% Bórax	4355

Para o aço carbono tratado por jateamento abrasivo seco, com revestimento, os diagramas de impedância são apresentados na Figura 16, em duas condições diferentes, antes e após o ensaio em câmara de condensação de umidade. Na Figura, nota-se pouca diferença na impedância, pois a mesma está dentro da mesma ordem de grandeza, comparando-se a condição inicial e aquela ensaiada após 744 horas, o que demonstra que a tinta não sofreu degradação significativa e manteve uma boa propriedade de barreira contra o meio corrosivo, impedindo a difusão do eletrólito para o substrato.



**Figura 16 - Diagramas de Nyquist para o aço carbono jateado revestido, em solução de NaCl 3,5%.**

Na Figura 17 encontra-se o resultado de impedância para o aço carbono com *flash rust*, com revestimento, na condição inicial e na ensaiada após 744 horas. Nesta Figura, pode ser observada uma reta de 45° após o primeiro semicírculo na amostra ensaiada, indício da difusão de eletrólito pelo revestimento, ou seja, permeação de eletrólito, e início da degradação do revestimento anticorrosivo.

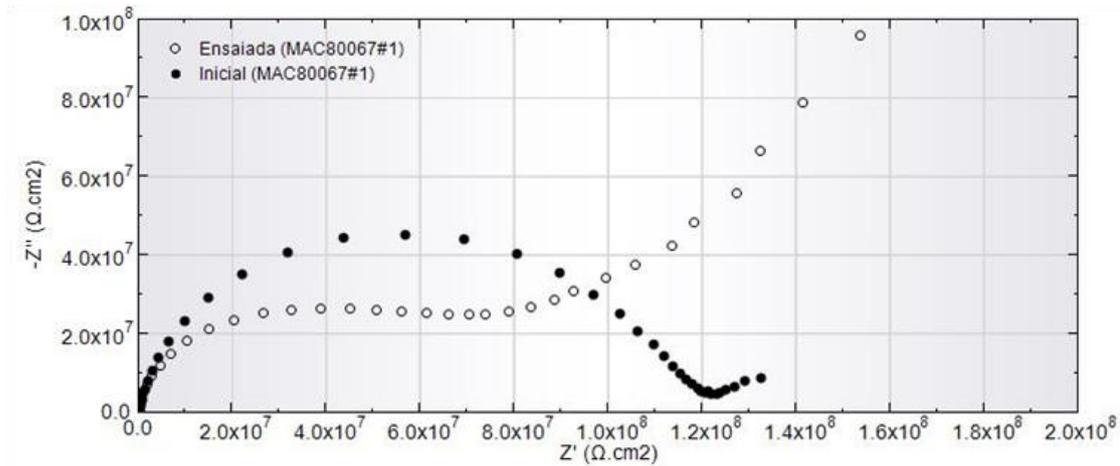


Figura 17 - Diagramas de Nyquist para o aço carbono com *flash rust* revestido, em solução de NaCl 3,5%.

Na Figura 18, encontram-se os diagramas de impedância para o aço carbono contaminado com 1% bórax e revestido, na condição inicial e na ensaiada, após 744 horas. Observou-se grande diferença de impedância entre a amostra inicial e a amostra ensaiada, ou seja, o revestimento teve sua propriedade de proteção por barreira reduzida de forma significativa devido à permeabilidade da água ocasionada pela presença do inibidor na superfície no substrato. Esta redução está associada à redução do arco capacitivo do diagrama de impedância, comparando-se o resultado após o ensaio inicial. Esse efeito também foi observado visualmente após o ensaio em câmara de umidade, com o surgimento de bolhas no revestimento.

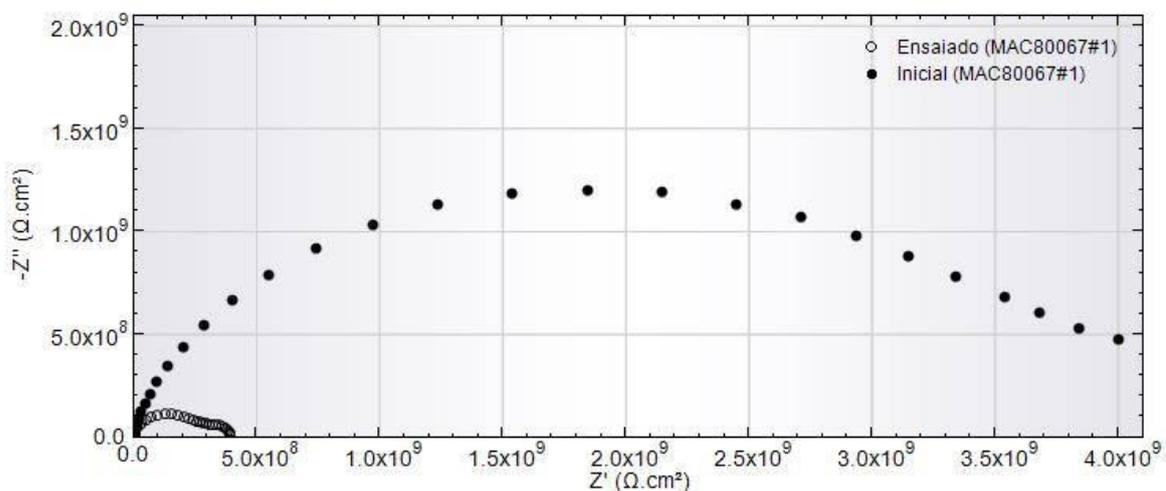
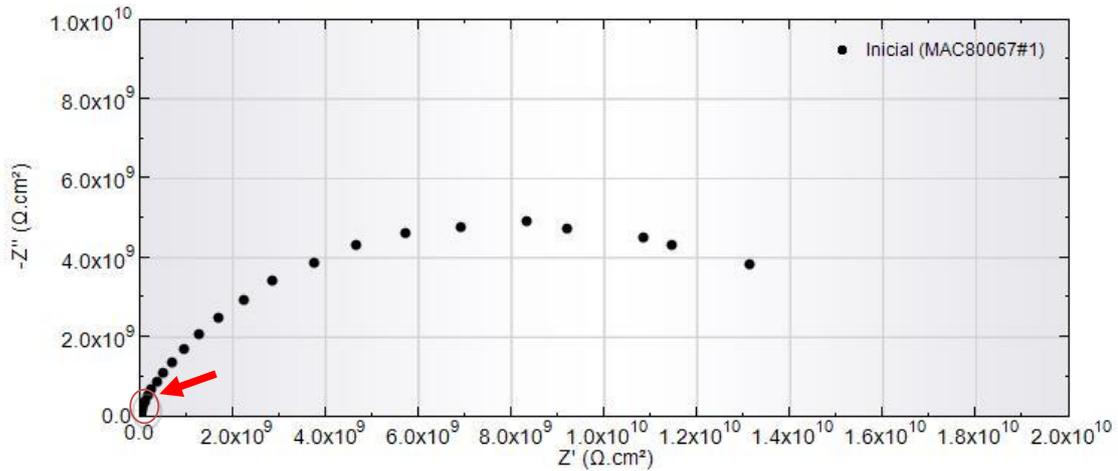


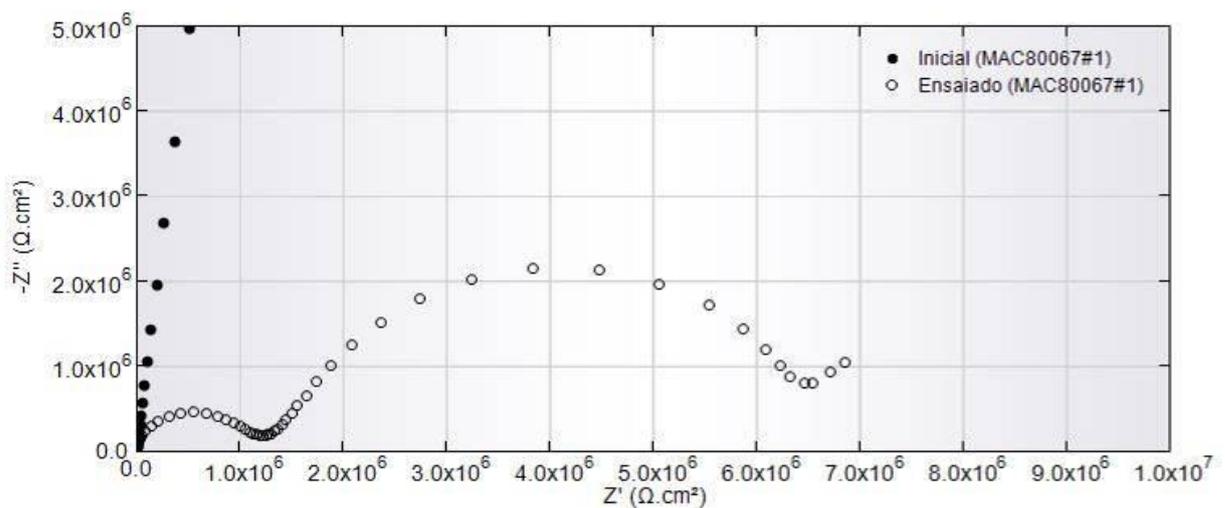
Figura 18 - Diagramas de Nyquist para o aço carbono contaminado com 1% bórax e revestido, em solução de NaCl 3,5%.

Nas Figuras 19 e 20, apresentam-se os resultados de impedância eletroquímica para o aço carbono contaminado com 5% bórax e revestido. O ensaio na câmara de condensação de umidade foi muito agressivo para esse corpo de prova, fato este registrado pela queda expressiva na impedância do revestimento, mostrando sua degradação. Esse efeito também foi observado visualmente após o ensaio na câmara, com o surgimento de bolhas no revestimento.

Na Figura 20, mostra-se uma ampliação da escala da Figura 19. Nesta Figura é possível verificar a presença de dois semicírculos, o primeiro relativo ao revestimento anticorrosivo e o segundo relativo à dupla camada elétrica. A presença da dupla camada elétrica indica corrosão acentuada sob o revestimento.



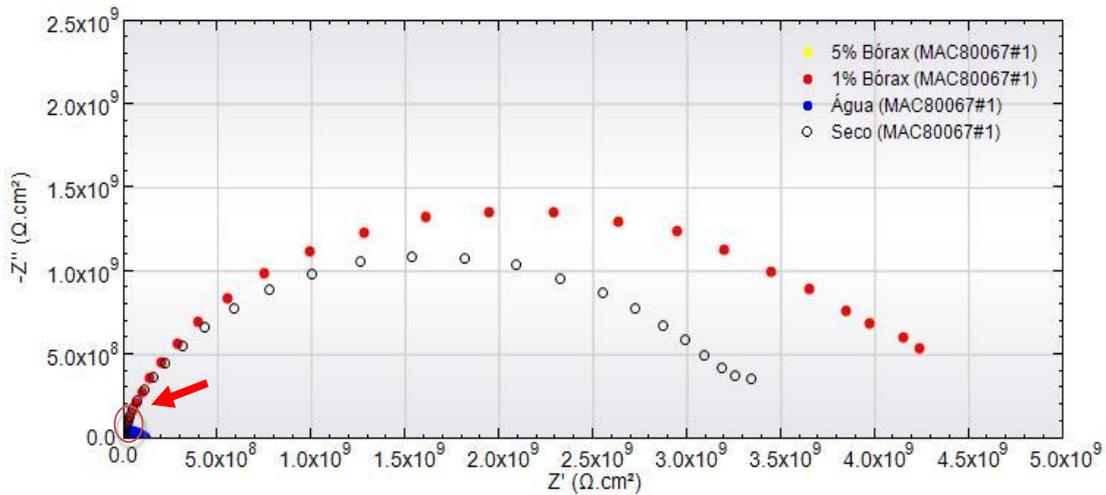
**Figura 19- Diagrama de Nyquist para o aço carbono contaminado com 5% bórax e revestido, em solução de NaCl 3,5%.**



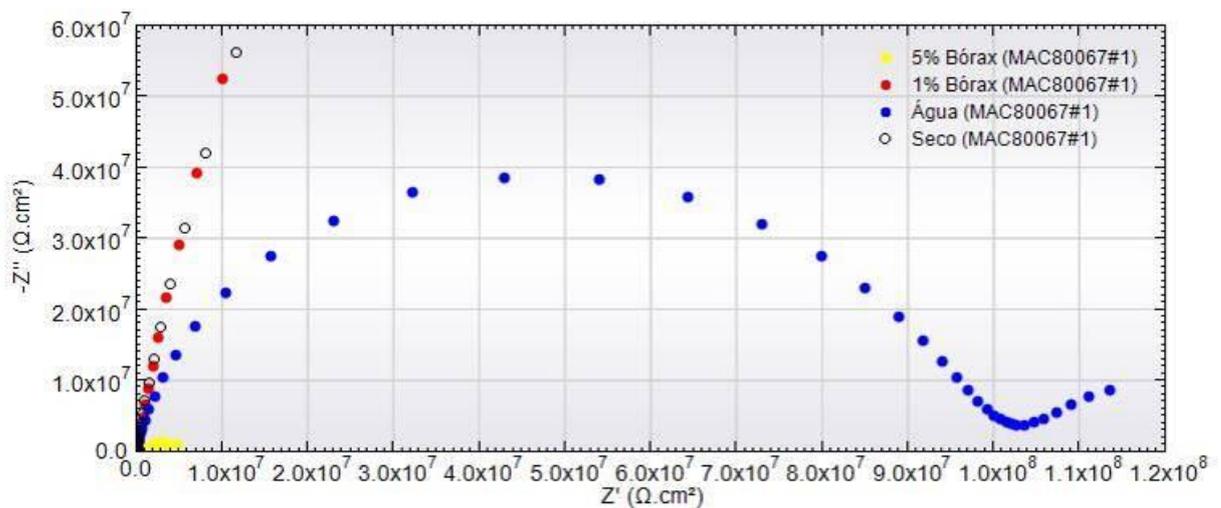
**Figura 20- Ampliação da escala do diagrama de Nyquist para o aço carbono contaminado com 5% bórax e revestido, em solução de NaCl 3,5%.**

Na Figura 21, é possível analisar os diagramas de Nyquist para o aço carbono revestido, com preparação de superfície em condições não contaminadas com bórax (seco e molhado somente com água deionizada) e em condições contaminadas, com diferentes teores de bórax, anteriormente ao ensaio em câmara de condensação de umidade. A região indicada pela seta vermelha é ampliada na Figura 22 para facilitar a visualização dos diagramas menores. Estes diagramas indicam que a concentração de bórax 1% se mostrou novamente como o melhor resultado do ponto de vista anticorrosivo, em conformidade com resultados anteriores. Porém, o efeito prejudicial da presença de bórax sob o revestimento, verificado pela degradação do mesmo quando exposto a condições agressivas, foi mais intenso do que seu benefício, atuando como um inibidor de corrosão. Este fato pode ser explicado pelo bórax ser um sal

solúvel e assim, acelerar a permeação de água através do revestimento, quando este foi ensaiado em condição de condensação de umidade.



**Figura 21-** Diagramas de Nyquist para o aço carbono revestido, com diferentes condições de preparação de superfície, em NaCl 3,5%, antes do ensaio na câmara de condensação de umidade.



**Figura 22.** Ampliação da escala da Figura 21.

## Conclusões

De acordo com os resultados mostrados foi possível concluir que:

- Com base em diferentes metodologias e técnicas, cujos resultados se complementaram, ficou evidente que, apesar do bórax ser reconhecido como um inibidor de corrosão para aço e zinco, este inibidor precisa de condições específicas para desempenhar um efeito positivo no combate à corrosão. Dentre essas condições, para o caso do aço carbono, é preciso que a concentração de bórax seja de 1%, o que é difícil de ser mantido em sistemas abertos, como por exemplo, processos de hidrojateamento na manutenção de linhas de transmissão.

- O bórax se torna um contaminante e não um auxiliar no combate a corrosão quando está sob um revestimento, uma vez é um sal higroscópico e, por isso, acelera a permeação de água através do revestimento, prejudicando seu desempenho anticorrosivo.
- O *flash rust* não se mostrou tão prejudicial para o revestimento anticorrosivo quanto a presença de bórax entre o substrato e o revestimento. Se a tinta for compatível com o *flash rust* e aplicada de maneira correta, o *flash rust* vai ter um desempenho anticorrosivo semelhante ao jateamento seco. Não é recomendável utilizar um inibidor de corrosão higroscópico para evitar o *flash rust* de uma superfície de aço carbono, porque o efeito prejudicial do inibidor deixado sob o revestimento é marcante.
- Logo, o uso de bórax na água de hidrojateamento para evitar o *flash rust* não deve ser recomendado nos serviços de hidrojateamento, visando à preparação de superfície para futuros trabalhos de pintura anticorrosiva.

### Referências bibliográficas

---

- (1) [http://www.aneel.gov.br/15anos/linha\\_do\\_tempo/transmissao.html](http://www.aneel.gov.br/15anos/linha_do_tempo/transmissao.html). Acesso em: 11 de set. 2015.
- (2) VICENTE GENTIL. **Corrosão** (1996), 3ª Edição.
- (3) ABNT NBR15239. “Tratamento de superfícies de aço com ferramentas manuais e mecânicas”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- (4) ORDINE, A. P.; CAFÉ, Y. H. P.; AMORIM, C. C.; MOURA, T. S.; SÁ, M. M. “Efeito da preparação de superfície de aço carbono na formação de produtos de corrosão sob tinta epóxi”. **1<sup>st</sup> Rio International Electrochemistry Workshop and Forum**, IQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- (5) SHREIR, L. L. **Corrosion Control**, London, Newnes-Butterworths, 1976. v.2, cap.18.2 e 18.3.
- (6) ABNT NBR 6210. “Corrosão atmosférica - materiais metálicos - Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- (7) ASTM D 4585. “Standard Practice for Testing Water Resistance of Coatings Using Controlled Condensation”. American Society for Testing and Materials, 2013.
- (8) ISO 4628/2. “Paints and varnishes – Evaluation of degradation of paint coatings- Designation of intensity, quantity and size of common types of defect - Part2: Designation of degree of blistering”. International Organization for Standardization, 2003.