



Universidade Federal do Ceará
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química
Curso de Engenharia Química

PRISCILLA FERNANDA DE OLIVEIRA FERREIRA

**ESTUDO DE INIBIDORES COMERCIAIS DE CORROSÃO PARA O AUMENTO DA
VIDA ÚTIL DE MATERIAIS METÁLICOS**

FORTALEZA
2018

PRISCILLA FERNANDA DE OLIVEIRA FERREIRA

ESTUDO DE INIBIDORES COMERCIAIS DE CORROSÃO PARA O AUMENTO DA
VIDA ÚTIL DE MATERIAIS METÁLICOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araújo

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F443e Ferreira, Priscilla Fernanda de Oliveira.
Estudo de inibidores comerciais de corrosão para o aumento da vida útil de materiais metálicos / Priscilla Fernanda de Oliveira Ferreira. – 2018.
64 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Walney Silva Araújo.
1. Inibidores de corrosão. 2. Cobre e suas ligas. 3. Técnicas eletroquímicas. 4. Perda de massa. I. Título.

CDD 680

PRISCILLA FERNANDA DE OLIVEIRA FERREIRA

ESTUDO DE INIBIDORES COMERCIAIS DE CORROSÃO PARA O AUMENTO DA
VIDA ÚTIL DE MATERIAIS METÁLICOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Walney Silva Araújo (orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Adriana de Oliveira Sousa Leite
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

Profª Dra. Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter sido minha força e meu amparo durante esses 5 anos de graduação, por Sua bondade e fidelidade e por todas as graças recebidas.

À Nossa Senhora, por toda intercessão e cuidado, e por sempre ouvir minhas preces.

Aos meus pais, Sandra e Francisco, pelo apoio incondicional durante toda a minha vida, por sempre me inspirarem a ser uma pessoa melhor e por todo amor recebido.

À minha irmã, Camila, por todo companheirismo e incentivo recebidos, pelas brincadeiras nos dias difíceis e pela amizade.

Aos meus amigos de graduação, Laryssa, Lucas, Patrícia, Rebeca, Emmanuel, Isabela, Mateus, pelos anos de sofrimento e amizade, pelos momentos de felicidade e estudo.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química, por todo o conhecimento transmitido ao longo dos anos.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão, em especial ao prof. Walney e à prof^a. Adriana, por todos os ensinamentos e orientações prestadas, pelo incentivo e por possibilitarem a realização deste trabalho. Aos meus colegas de trabalho, pela companhia diária e também por toda a ajuda recebida, foi muito agradável ter convivido com todos durante esses 2 anos.

“Triunfam aqueles que sabem quando lutar e quando esperar. ”

Sun Tzu

RESUMO

A corrosão é um processo espontâneo resultante da interação do meio com a superfície metálica que, por vezes, pode causar a deterioração de equipamentos, diminuindo, assim, a vida útil desses materiais e gerando custos extras de manutenção e reparos. Dessa forma, o presente trabalho avaliou o desempenho do inibidor comercial AZ 8101[®], da *GE Water&Process Technologies*, que é usado para combater a corrosão do cobre e suas ligas. Foram realizadas algumas técnicas que avaliam a taxa de corrosão: perda de massa, polarização linear e impedância eletroquímica. A fim de simular água de resfriamento, foi utilizada a água da rede de abastecimento com adição de cloreto de sódio nas concentrações de 250 e 500 ppm além de concentrações de 5, 10 e 25 ppm de inibidor. Os resultados foram satisfatórios para todas as concentrações avaliadas, atingindo eficiências de inibição acima de 90% para os dois meios avaliados, tanto nos ensaios de polarização como nos ensaios de impedância. Ensaios de perda de massa para o meio de 250 ppm de Cl⁻ tiveram duração de 28 dias, no entanto, apenas as amostras imersas no meio sem inibidor apresentaram variação de massa. Para o meio de 500ppm de Cl⁻ foram realizados por 15 dias, porém não foi constatada variação de massa expressiva em nenhum dos meios avaliados. Quanto à análise do mecanismo de adsorção, a melhor aproximação foi para a isoterma de Langmuir. Além disso, a amostra de melhor desempenho para o meio de 500 ppm de NaCl, com concentração de 5 ppm de inibidor, foi submetida à análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) a fim de se avaliar as características microestruturais e a composição dos produtos de corrosão, o resultado foi coerente com os demais ensaios apresentados, mostrando que o meio sem inibidor apresentou sinais evidentes de corrosão, com a formação de CuCl, CuO e Cu₂O.

Palavras-chave: Inibidores de corrosão. Cobre e suas ligas. Técnicas eletroquímicas. Perda de massa.

ABSTRACT

Corrosion is a spontaneous process resulting from the interaction of the medium with the metal surface that can sometimes cause equipment deterioration, thus reducing the life of these materials and generating extra costs of maintenance and repairs. Thus, the present work evaluated the performance of the commercial inhibitor AZ 8101® from *GE Water & Process Technologies*, which is used to combat the corrosion of copper and its alloys. Some techniques were used to evaluate the corrosion rate: weight loss, linear polarization and electrochemical impedance. In order to simulate cooling water, water from the supply network was added with addition of sodium chloride at concentrations of 250 and 500 ppm in addition to concentrations of 5, 10 and 25 ppm of inhibitor. The results were satisfactory for all concentrations evaluated, reaching inhibition efficiencies above 90% for the two media evaluated, both in the polarization assays and in the impedance assays. Weight loss tests for the medium of 250 ppm of Cl⁻ had duration of 28 days, however, only the samples immersed in the medium without inhibitor showed mass variation. For the medium of 500ppm Cl⁻ were performed for 15 days, but no significant mass variation was found in any of the media evaluated. As for the analysis of the adsorption mechanism, the best approximation was for the Langmuir isotherm. In addition, the best performance sample for the 500 ppm NaCl medium, with a concentration of 5 ppm of inhibitor, was submitted to Scanning Electron Microscopy (SEM) and Dispersive Energy Spectroscopy (EDS) in order to evaluate the microstructural characteristics and the composition of the corrosion products, the result was consistent with the other tests presented, showing that the medium without inhibitor showed evident signs of corrosion with the formation of CuCl, CuO and Cu₂O.

Keywords: Inhibitors of corrosion. Copper and its alloys. Electrochemical techniques. Weight loss.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características dos sistemas de resfriamento	17
Figura 2 - Incrustações de carbonato de cálcio formadas em um condensador (à esquerda) e em um trocador de calor (à direita) com tubos de cobre. ...	18
Figura 3 - Trecho de tubo de latão com corrosão galvânica	19
Figura 4 - Tubos de cobre com produtos de corrosão saindo pelas perfurações (pites)	20
Figura 5 - Corrosão acentuada embaixo das áreas de contato	20
Figura 6 - Tubo de latão que sofreu processo de corrosão por tensão fraturante, após contato com amônia	21
Figura 7 - Corrosão por dezincificação	21
Figura 8 - Corrosão característica de abrasão e de cavitação, respectivamente. .	22
Figura 9 - Trecho de feixe de tubos com fouling bacteriano	22
Figura 10 - Ilustração esquemática do processo de adsorção	26
Figura 11 - Modificação do potencial de corrosão e da corrente de corrosão pela presença de um inibidor anódico	28
Figura 12 - Modificação do potencial de corrosão e da corrente de corrosão pela presença de um inibidor catódico	29
Figura 13 - Modificação do potencial de corrosão e da corrente de corrosão pela presença de um inibidor misto	30
Figura 14 - Sais de azóis	31
Figura 15 - Sais de azóis mais usados em sistemas de resfriamento	31
Figura 16 - Estrutura molecular do toliltriazol	33
Figura 17 - Esquema de célula eletroquímica de 3 eletrodos	35
Figura 18 - Curvas de OCP para o meio de 250 ppm Cl ⁻	39
Figura 19 - Curvas de OCP para o meio de 500 ppm de Cl ⁻	39
Figura 20 - Polarização para o meio de 250 ppm de Cl ⁻	40
Figura 21 - Sobretensão para o meio de 250 ppm Cl ⁻	41
Figura 22 - Polarização para o meio de 500 ppm Cl ⁻	43
Figura 23 - Sobretensão para o meio de 500 ppm Cl ⁻	43
Figura 24 - Diagrama de Nyquist para o meio de 250 ppm Cl ⁻	45

Figura 25 - Diagrama Bode - Impedância para o meio de 250 ppm Cl ⁻	46
Figura 26 – Diagrama de Nyquist para o meio de 500 ppm Cl ⁻	47
Figura 27 - Diagrama Bode - Impedância para o meio de 500 ppm Cl ⁻	48
Figura 28 - Registro fotográfico dos corpos de prova após imersão no meio de 250 ppm de Cl ⁻ por 28 dias	49
Figura 29 - Registro fotográfico dos corpos de prova após imersão no meio de 500 ppm de Cl ⁻ por 14 dias	50
Figura 30 - Isoterma de Langmuir para o meio de 250 ppm Cl ⁻	51
Figura 31 - Isoterma de Langmuir para o meio de 500 ppm Cl ⁻	52
Figura 32 - Fotos dos ensaios eletroquímicos para o Branco (250 ppm de Cl ⁻)	53
Figura 33 - Fotos dos ensaios eletroquímicos para 5 ppm de AZ 8101 para 250 ppm de Cl ⁻	54
Figura 34 - Fotos dos ensaios eletroquímicos para o Branco (500 ppm de Cl ⁻).....	55
Figura 35 - Fotos dos ensaios eletroquímicos para 5 ppm de AZ 8101 para 500 ppm de Cl ⁻	56
Figura 36 - MEV para amostra de cobre puro	57
Figura 37 - EDS para o cobre puro	57
Figura 38 - MEV para o cobre imerso em solução de 5 ppm de inibidor e 500 ppm de Cl ⁻	58
Figura 39 - EDS para o cobre imerso em solução de 5 ppm de inibidor e 500 ppm de Cl ⁻	58
Figura 40 - MEV para o cobre imerso em meio de 500 ppm de Cl ⁻	59
Figura 41 - EDS para o cobre imerso em meio de 500 ppm de Cl ⁻	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - pH das soluções.....	33
Tabela 2 - Parâmetros eletroquímicos da oxidação do cobre em meio de 250 ppm Cl ⁻ com adição de diferentes concentrações do inibidor AZ 8101	42
Tabela 3 - Parâmetros eletroquímicos da oxidação do cobre em meio de 500 ppm Cl ⁻ com adição de diferentes concentrações do inibidor AZ 8101	44
Tabela 4 - Parâmetros de EIS para o meio de 250 ppm Cl ⁻	46
Tabela 5 - Parâmetros de EIS para o meio de 500 ppm Cl ⁻	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Cobre	16
2.1.1	<i>Características</i>	16
2.1.2	<i>Usos</i>	16
2.1.3	<i>Sistemas de água de resfriamento</i>	16
2.2	Corrosão.....	18
2.2.1	<i>Definição</i>	18
2.2.2	<i>Reações envolvidas no processo corrosivo para o cobre</i>	23
2.2.3	<i>Fatores que influenciam o meio corrosivo</i>	23
2.3	Técnicas para avaliar a corrosão	24
2.3.1	<i>Potencial de circuito aberto (OCP)</i>	25
2.3.2	<i>Curva de polarização linear (CP)</i>	25
2.3.3	<i>Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)</i>	25
2.3.4	<i>Perda de massa</i>	25
2.3.5	<i>Isotermas de adsorção</i>	25
2.3.6	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)</i>	26
2.4	Inibidores de Corrosão	27
2.4.1	<i>Definição</i>	27
2.4.2	<i>Tipos</i>	27

2.4.3	<i>Específicos para cobre</i>	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Preparo das soluções	33
3.2	Preparo dos corpos de prova.....	34
3.3	Ensaio eletroquímicos.....	34
3.4	Ensaio de Perda de massa.....	36
3.5	Isotermas de adsorção	37
3.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1	Potencial de circuito aberto (OCP).....	38
4.2	Polarização linear (CP).....	40
4.3	Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS).....	44
4.4	Perda de massa	49
4.4.1	<i>Solução de 250 ppm Cl</i>	49
4.4.2	<i>Solução de 500 ppm Cl</i>	49
4.5	Isotermas de Adsorção.....	50
4.6	Análises de microscopia	52
4.6.1	<i>Fotos de microscopia óptica</i>	52
4.6.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)</i>	56
5	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O uso do cobre em aplicações industriais tem aumentado nos últimos anos devido à sua alta resistência e versatilidade. Dentre as aplicações estão: em tubulações usadas na construção civil e equipamentos (compressores, torres de resfriamento, trocadores de calor); na fabricação de componentes para a indústria automobilística; e na indústria náutica. Além disso, o cobre não emite gases tóxicos, ainda que seja submetido a altas temperaturas, podendo ainda ser reciclado integralmente.

Como todo material metálico, o cobre está suscetível a processos corrosivos, nesse sentido, é importante o desenvolvimento de estratégias para minimizar possíveis danos, como vazamentos de produtos e incrustações, promovendo o aumento da vida útil desse material.

Uma das maneiras mais simples e eficazes de se evitar a corrosão é por meio da adição de inibidores de corrosão que podem reduzir em até 95% a velocidade das reações de corrosão. (ABRACO, 2007)

Segundo Fateh, Aliofkhazraei e Rezvanian (2017), compostos de azóis (tiazol, benzotriazol, imidazol e tiadiazol) e outros derivados de nitrogênio podem ser considerados os mais importantes inibidores de corrosão utilizados para a proteção do cobre.

Baseado nisso, o presente trabalho avaliará o desempenho de um inibidor comercial, o AZ 8101[®], da empresa *GE Water&Process Technologies*, que tem como seu principal constituinte um azol: 4(ou 5)-metil-1H-benzotriazolida de sódio, também chamado de toliltriazol. Ensaios para avaliar a taxa de corrosão foram realizados com a simulação de água de resfriamento em diferentes concentrações do inibidor.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo Geral*

Avaliar a melhor condição de operação do inibidor comercial AZ 8101[®] simulando condições de aplicações industriais em tubulações de cobre.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

Caracterizar o cobre utilizado por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDX ou EDS).

Estudar a resistência da solução com inibidor à corrosão por meio de técnicas eletroquímicas.

Determinar a taxa de perda de massa do substrato metálico para todas as concentrações estudadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cobre

2.1.1 Características

O cobre foi um dos primeiros metais descobertos pelo homem e destaca-se entre os metais devido a importantes propriedades: possui boa condutividade elétrica e resistência à corrosão quando comparado a outros metais (aço carbono, por exemplo); é um material facilmente moldável, por isso é muito usado na forma de fios e na fabricação de equipamentos; e é antibactericida, pois não permite o acúmulo de bactérias em sua superfície (ALVES, 2012).

2.1.2 Usos

Os usos mais comuns do cobre e suas ligas são: construção civil (fabricação de tubos em edificações); fios e chapas para a fabricação de produtos elétricos e eletrônicos usados em computadores e nos motores de veículos (fios, conectores, freios, rolamentos, radiadores e até mesmo no próprio motor.); maquinários e equipamentos industriais, como torres de resfriamento, condensadores, compressores, conectores elétricos, componentes de refrigeração, em usinas de açúcar, em instalações hidráulicas, de gás e resistentes a incêndio; indústria naval, constituindo um dos principais componentes dos cascos dos navios (FATEH et al, 2017; ANYADIKE, 2002;).


2.1.3 Sistemas de água de resfriamento

Em muitos processos industriais é preciso resfriar máquinas, fluidos e equipamentos que geram ou recebem energia durante sua operação. O fluido mais comumente usado é a água. Isso se deve às suas características favoráveis, como: absorção de grandes quantidades de calor por unidade de volume, baixa viscosidade, condutividade térmica elevada, grande estabilidade química, entre outras. É importante ressaltar que a água é naturalmente corrosiva e somado a isso inúmeros fatores de natureza física e químicos/eletroquímicos podem aumentar ainda mais a ocorrência da corrosão, por isso, existem tratamentos específicos a fim

de garantir uma melhor qualidade do meio em questão, como será visto posteriormente (JAMBO; FÓFANO, 2008).


Antes de abordar os problemas típicos dos sistemas de resfriamento convém classificá-los quanto ao reaproveitamento de água em três tipos (JAMBO; FÓFANO, 2008), conforme destacado na Figura 1.

Figura 1 - Características dos sistemas de resfriamento




Sistemas abertos

- A água não é reaproveitada após o uso.
- Geralmente são usados quando há grande disponibilidade de água no local, como indústrias próximas ao mar.



Sistemas semi-abertos

- Após o uso a água é resfriada em uma torre de resfriamento e retorna ao sistema posteriormente



Sistemas fechados

- A água circula em circuito fechado, sem contato direto com o fluido que a resfria para a reutilização.

Fonte: JAMBO; FÓFANO, 2008

Segundo Dantas (1988), nos sistemas em que a água é reutilizada, é necessário que a água passe por um eficiente tratamento químico e físico, visto que a ocorrência de *fouling* pode afetar a remoção de calor dos equipamentos. *Fouling* é qualquer acúmulo indesejado, em geral, inorgânico (produtos de corrosão ou incrustações, como sais de cálcio e magnésio), orgânico (proveniente de fluidos de processo) e biológico (oriundo de algas, fungos e bactérias que formam limo), que se deposita na superfície de transferência de calor.

A presença de *fouling* nos sistemas de resfriamento pode ocasionar diversos prejuízos em relação ao bom funcionamento dos equipamentos, por exemplo: diminuição das taxas de troca térmica em trocadores de calor, visto que as incrustações diminuem a condutividade térmica; obstrução e até mesmo destruição

do enchimento das torres de resfriamento; obstrução, parcial ou total, de tubos e acessórios, que diminuem a área de fluxo e limitam a vazão de escoamento; entupimento de bicos e dispositivos que distribuem a água nas torres de resfriamento, causando canais preferenciais que reduzem a eficiência do equipamento, como pode ser visto na Figura 2; aumento dos processos corrosivos que ocorrem sob depósito (corrosão por aeração diferencial) (TROVATI, 2018).

A fim de evitar os danos citados, a água de resfriamento é tratada por meio de vários processos como: clarificação, cloração, controle de pH e microbiológico, adição de inibidores de corrosão, agentes anti-incrustantes ou dispersantes, abrandamento ou desmineralização e monitoração da corrosão, a fim de minimizar uma possível contaminação da água (JAMBO; FÓFANO, 2008; GENTIL, 2007).

Figura 2 - Incrustações de carbonato de cálcio formadas em um condensador (à esquerda) e em um trocador de calor (à direita) com tubos de cobre.



Fonte: TROVATI, 2018.

2.2 Corrosão

2.2.1 Definição

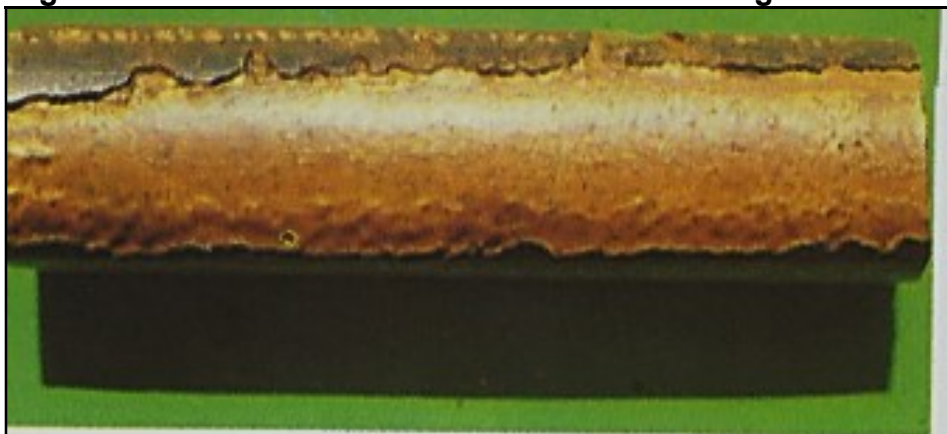
A corrosão pode ocorrer de diferentes formas e mecanismos, desse modo, controlá-la é por vezes complicado, de modo que não se consegue eliminá-la, mas sim reduzi-la a níveis aceitáveis. A prevenção deve iniciar no projeto das

instalações, por meio da especificação correta dos materiais do sistema, bem como por meio da escolha adequada do local da instalação e do meio a ser usado.

A seguir serão abordados os principais tipos de corrosão associados ao uso de água de resfriamento, são eles (TROVATI, 2018; GENTIL, 2007):

a) **Corrosão galvânica:** ocorre quando dois metais de potenciais¹ diferentes são colocados em contato ou imersos em meio de um eletrólito. Assim, o metal de menor potencial sofre oxidação e o metal de maior potencial, redução. Esse tipo de corrosão está retratado na Figura 3. Além disso, é comum sua ocorrência em trocadores de calor quando o material dos tubos é diferente do material usado nas chicanas ou no casco².

Figura 3 - Trecho de tubo de latão com corrosão galvânica



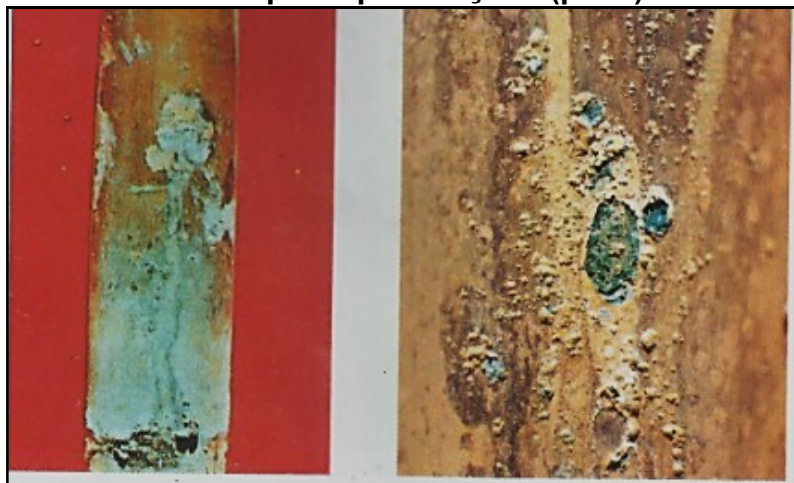
Fonte: GENTIL, 2007

b) **Corrosão puntiforme ou por pite:** ocorre em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo perfurações. Devido ao seu alto poder de penetração e difícil detecção, é uma das formas de corrosão mais indesejáveis. Geralmente este tipo de corrosão aparece em áreas com diferenças de potencial significativas, em pontos de falha de filmes de proteção e em regiões de elevadas concentrações de íons, entre outros, conforme está ilustrado na Figura 4.

¹Potencial (de redução): refere-se à espontaneidade, ou à tendência de uma espécie química receber elétrons e, desse modo, ser reduzida.

²Chicana: é parte integral de um trocador de calor que tem como função dar suporte aos tubos e mantê-los na posição adequada durante a operação.

Figura 4 - Tubos de cobre com produtos de corrosão saindo pelas perfurações (pites)

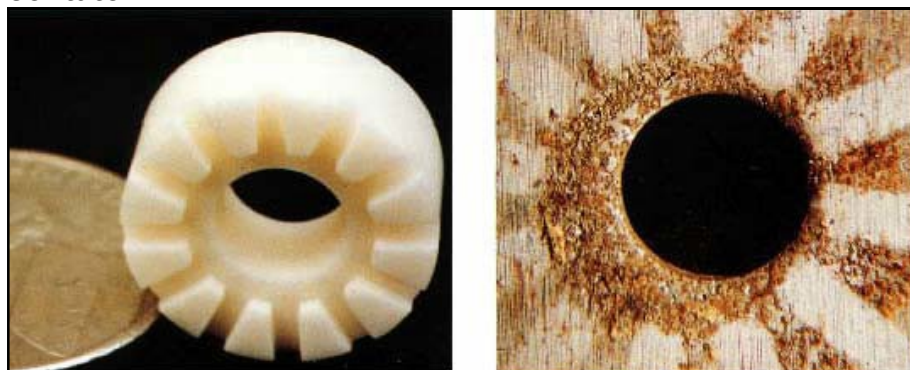


Fonte: GENTIL, 2007

c) **Corrosão por aeração diferencial:** ocorre em decorrência da presença de depósitos porosos na superfície metálica. As áreas cobertas por esses depósitos permanecem com baixa aeração e funcionam como áreas anódicas, as áreas que estão limpas apresentam comportamento catódico. É um tipo de corrosão localizada;

d) **Corrosão sob fissura ou cavidades (“Crevice Corrosion”):** ocorre em áreas isoladas tais como fendas, rachaduras, embaixo de depósitos, rebites, zonas de estagnação etc. Como está mostrado na Figura 5. Este tipo de corrosão é muito encontrado em soldas, principalmente quando mal elaboradas;

Figura 5 - Corrosão acentuada embaixo das áreas de contato



Fonte: TROVATI, 2018

e) **Corrosão por tensão fraturante (“Stress Corrosion Cracking”)**: ocorre devido a tensões no metal em um ambiente propenso à corrosão. Com frequência, ocasiona a quebra ou fissura do material nessa região. Em ligas de latão (cobre e zinco) essa forma de corrosão aparece quando há concentração razoável de íons amônio (NH_4^+), que tendem a reagir com o cobre formando complexos, como está ilustrado na Figura 6;

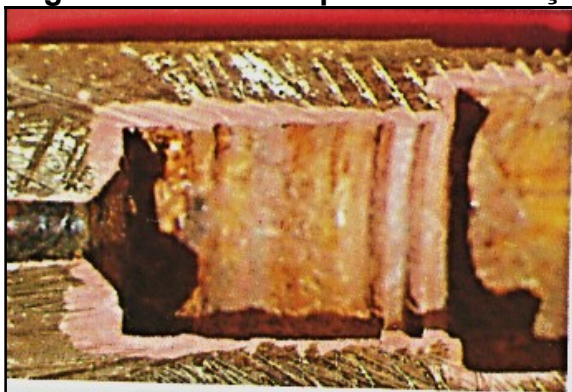
Figura 6 - Tubo de latão que sofreu processo de corrosão por tensão fraturante, após contato com amônia



Fonte: TROVATI, 2018.

f) **Corrosão seletiva ou dezincificação**: ocorre em ligas de cobre e zinco (latão), onde é admitido que o zinco sofre corrosão, restando apenas o cobre, destacado pela aparência avermelhada característica, como mostra a Figura 7;

Figura 7 - Corrosão por dezincificação

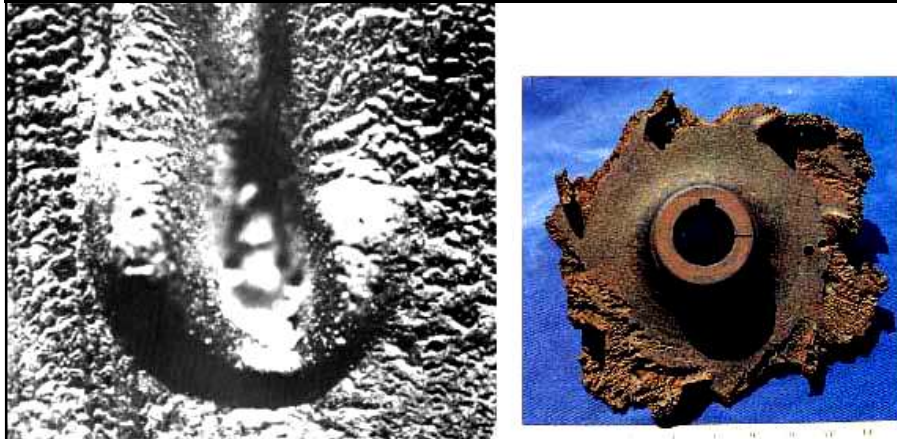


Fonte: GENTIL, 2007

g) **Erosão**: ocorre a deterioração da superfície metálica devido à ação abrasiva de fluido com partículas sólidas em suspensão, ver Figura 8. É muitas

vezes a causadora das falhas em sistemas de resfriamento, visto que também acelera a intensidade dos processos corrosivos citados;

Figura 8 – Corrosão característica de abrasão e de cavitação, respectivamente.



Fonte: TROVATI, 2018.

h) **Corrosão microbiológica:** ocorre o crescimento de microorganismos e a formação de biofilme, criando-se condições anaeróbicas. Desse modo, trocadores de calor, por exemplo, sofrem corrosão por aeração diferencial, justamente por causa da formação de depósitos de origem microbiana ou pela ação de bactérias redutoras de sulfato, como exemplifica a Figura 9.

Figura 9 - Trecho de feixe de tubos com fouling bacteriano

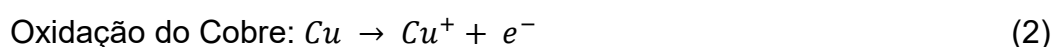
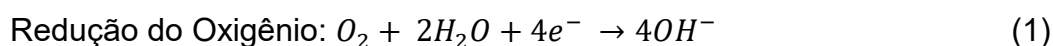


Fonte: GENTIL, 2007

2.2.2 Reações envolvidas no processo corrosivo para o cobre

A presença de íons na água de resfriamento, como os cloretos, pode acelerar o processo corrosivo dos sistemas de resfriamento, bem como a presença de outros íons, tais como: cálcio, ferro, magnésio.

Dentre as reações mais comuns, que ocorrem nos sistemas de resfriamentos, destacam-se as equações (1), (2), (3) e (4):



Todavia, Cu^+ o reage com o íon cloreto para formar um filme solúvel na superfície do metal:



Devido à instabilidade do filme formado, ele reage novamente com o cloreto presente no meio para formar:



2.2.3 Fatores que influenciam o meio corrosivo

Os principais fatores que afetam a corrosividade da água são (JAMBO; FÓFANO, 2008):

a) **Gases dissolvidos:** o oxigênio age como despolarizante³ da reação catódica ao inibir o processo de polarização por ativação ou concentração, o que promove o aumento da taxa de corrosão. O processo mais típico da influência desse gás é relacionado à aeração diferencial, em que áreas anódicas e catódicas são formadas na superfície do material. O gás carbônico promove a diminuição do pH do meio devido à formação do ácido carbônico ($H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + H_2CO_3^-$), que também acelera o processo corrosivo;

³Despolarizante: decréscimo ou eliminação da polarização de um eletrodo com consequente aumento da corrosão.

b) **Sólidos em suspensão:** geralmente são constituídos por resíduos como areia, produtos de corrosão, que, em caso de precipitação, estimulam a ocorrência da corrosão por aeração diferencial. Além disso, a presença de sólidos diminui a eficiência de troca térmica dos equipamentos e provoca o entupimento dos tubos em trocadores de calor;

c) **Sais dissolvidos:** na maioria dos casos, o aumento da concentração de sais no meio acarreta o aumento de sua corrosividade, visto que a condutividade elétrica da solução aumenta. O exemplo clássico dessa influência é o íon cloreto;

d) **Microrganismos:** causam diversos problemas como despolarização, problemas de aeração diferencial, algumas espécies de bactérias produzem substâncias ácidas, além do problema característico de *biofouling*⁴ e formação de *slime*⁵;

e) **Temperatura:** em geral, o aumento da temperatura acarreta o aumento da taxa de corrosão;

f) **pH:** em meios ácidos, em geral, tem-se uma corrosão mais acelerada,

g) **Velocidade:** a tendência natural é que o aumento da velocidade acelere o processo corrosivo, visto que há a possibilidade de remoção de películas passivadoras⁶. Entretanto, uma velocidade muito baixa pode ser prejudicial, pois podem causar a estagnação em curvas, frestas e sob depósito, condições que aceleram a corrosão.

2.3 Técnicas para avaliar a corrosão

Nesta seção, são apresentadas as técnicas utilizadas na referida pesquisa que possibilitam o monitoramento e avaliação da taxa de corrosão no sistema estudado (PANOSSIAN, 1993; WOLYNEC, 2002).

⁴Biofouling: (ou incrustação biológica) é o acúmulo de microorganismos, plantas, algas ou animais em superfícies.

⁵Slime: é o termo técnico para indicar a lama orgânica gerada pela presença de microrganismos em sistemas de resfriamento.

⁶ Película passivadora: formação de um filme na superfície metálica que impede o progresso da corrosão.

2.3.1 Potencial de circuito aberto (OCP)

Consiste no acompanhamento do valor do potencial de corrosão do metal em solução ao longo do tempo, até que o mesmo atinja um patamar de estabilidade. É uma técnica passível de ser utilizada para a avaliação do comportamento de inibidores de corrosão para a observação do deslocamento do valor do potencial em relação à solução sem inibidor.

2.3.2 Curva de polarização linear (CP)

Consiste na imposição de um potencial externo, por um potenciostato, por exemplo, em que ocorre a alteração da diferença de potencial através da dupla camada elétrica (polarização do eletrodo). A curva representa a relação entre o potencial de eletrodo aplicado e a correspondente corrente medida no potenciostato. Esta técnica pode fornecer meios para a medida quantitativa de diversos parâmetros eletroquímicos da corrosão, tais como taxa de corrosão e declives da curva de Tafel.

2.3.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)

Consiste em aplicar um potencial de corrente alternada com diferentes valores de frequência. Apresenta como vantagens a possibilidade de estudar as reações de corrosão e medir taxas de corrosão mesmo em meios de baixa condutividade, além de permitir medir a resistência de polarização e a capacitância da dupla camada numa mesma medida.

2.3.4 Perda de massa

É um método quantitativo de observação de quanto de massa o material pode perder quando em contato com as substâncias avaliadas, traduz a taxa de corrosão em mm/ano e a eficiência da substância inibidora baseado em determinado tempo de imersão, esta técnica tem uma proximidade maior com a utilização real do sistema proposto.

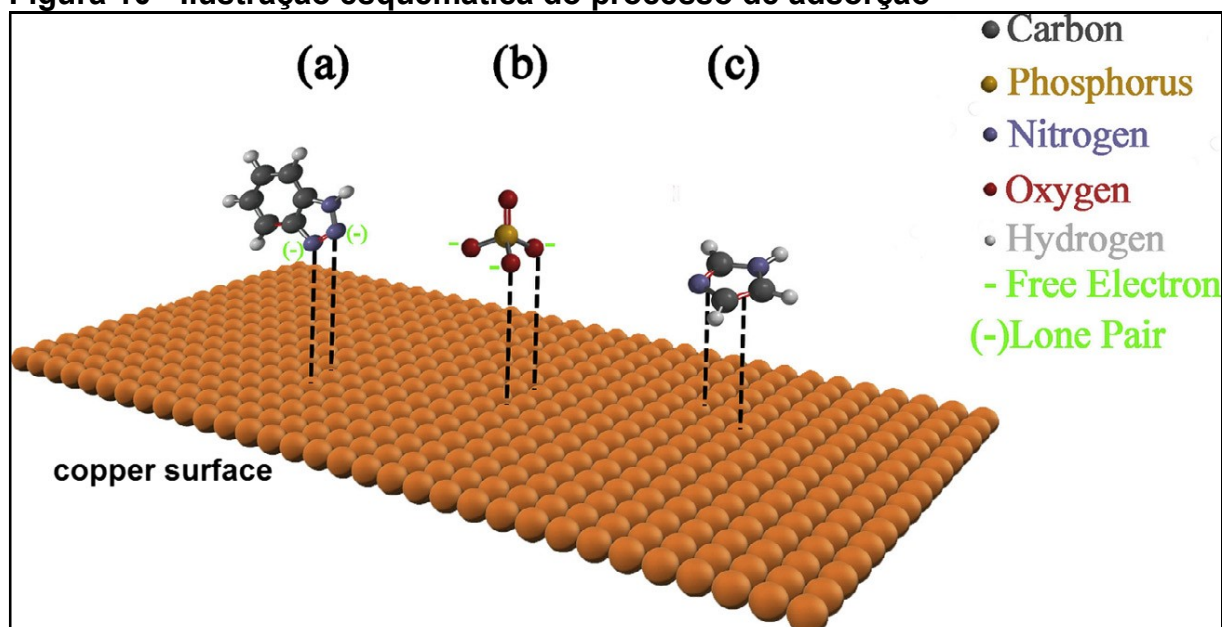
2.3.5 Isotermas de adsorção

O comportamento de inibição de um inibidor de corrosão depende do comportamento de adsorção. Sabe-se que superfície dos metais em ambientes aquosos é coberta por moléculas polares de água. Sendo assim, acredita-se que o

processo de adsorção de um inibidor orgânico de corrosão na superfície do metal envolve o deslocamento de uma ou mais moléculas de água pré-adsorvidas por moléculas inibidoras de corrosão na interface metal / solução (MORETTI; GUIDI, 2002).

O processo de adsorção do inibidor na superfície do metal (com carga positiva) pode ocorrer de várias formas: interação bipolar entre elétrons de pares isolados da superfície do metal e do inibidor de corrosão; atração eletrostática entre a superfície metálica eletricamente carregada e os íons dos inibidores de corrosão; interação do tipo p com metal; ou uma combinação destes mecanismos, conforme ilustrado na Figura 10 (FATEH, ALIOFKHAZRAEI E REZVANIAN, 2017).

Figura 10 - Ilustração esquemática do processo de adsorção



Fonte: FATEH, ALIOFKHAZRAEI E REZVANIAN, 2017

2.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

O MEV é um microscópio de alta resolução que produz imagens da superfície dos materiais, tendo como vantagem a capacidade e larga faixa de ampliação. Já a EDS (ou EDX) é um espectrômetro de raios X que permite determinar com precisão a composição química de uma região da superfície metálica, sendo importante na determinação da composição dos filmes formados devido ao processo corrosivo ou por ação de inibidores.

2.4 Inibidores de Corrosão

2.4.1 Definição

Segundo Gentil (2007), inibidores de corrosão são substâncias ou misturas de substâncias que, quando acrescentadas em quantidades adequadas, são capazes de reduzir ou eliminar a corrosão. São os métodos de controle de corrosão mais empregados em sistemas de resfriamento (TROVATI, 2018).

2.4.2 Tipos

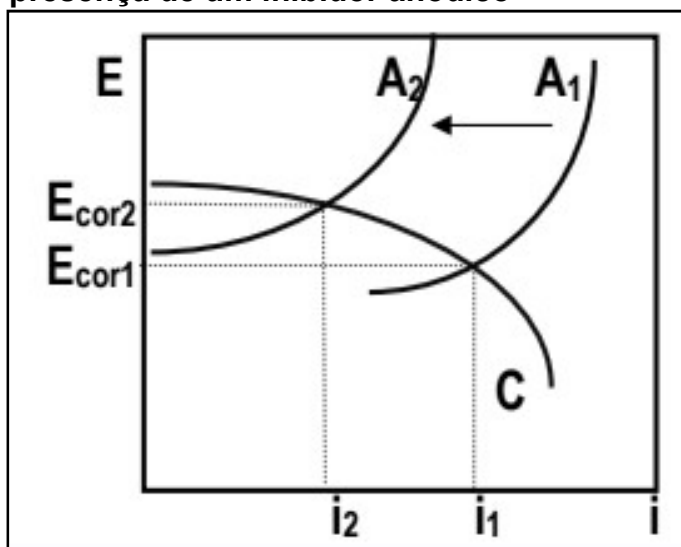
Os inibidores usados em água de resfriamento podem ser classificados como: anódicos, catódicos e mistos. Geralmente, a fim de se obter uma melhor eficiência de inibição, usam-se misturas de inibidores, pois nestes casos um efeito sinérgico é obtido, potencializando as propriedades da combinação de inibidores que são superiores às suas utilizações isoladas (TROVATI, 2018).

2.4.2.1 Inibidores anódicos

São aqueles que agem inibindo as reações de oxidação, ao interferir na formação do produto de corrosão e formar um filme aderente e insolúvel na superfície do metal. Convém ressaltar que para cada inibidor há uma concentração crítica, acima da qual há inibição, e abaixo dela não há uma proteção efetiva, visto que o filme protetor não se forma em toda extensão. Entre os inibidores anódicos mais conhecidos estão: cromatos, molibdatos, nitritos, fosfino carboxílicos, fosfono carboxílicos, ortofosfatos e silicatos (GENTIL, 2007; JAMBO, FÓFANO, 2008).

A figura 11 ilustra o comportamento da curva de polarização com a presença de um inibidor anódico (2) em relação ao meio sem inibidor (1). É perceptível que o ramo anódico da curva é deslocado para valores de potenciais mais positivos e a densidade de corrente, em relação ao potencial de corrosão, diminui.

Figura 11 - Modificação do potencial de corrosão e da corrente de corrosão pela presença de um inibidor anódico



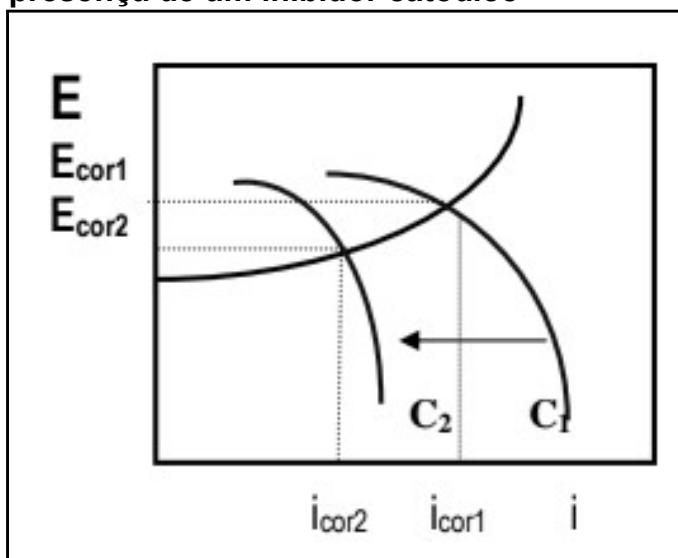
Fonte: apostila de inibidores, disponível em:
http://www.ufrgs.br/lapec/wa_files/inibidores_20_20apost.pdf

2.4.2.2 Inibidores catódicos

Atuam por meio da formação de um filme sobre a superfície metálica, limitando a capacidade do oxigênio de se reduzir no cátodo. Além disso, impedem a difusão do oxigênio e a condução de elétrons, reduzindo a possibilidade da corrosão por pites. Entre os principais inibidores catódicos estão: íons de zinco, polifosfatos e fosfonatos (GENTIL, 2007; JAMBO, FÓFANO, 2008).

A figura 12 mostra o comportamento da curva de polarização com a presença de um inibidor catódico (2) em relação ao meio sem inibidor (1). É perceptível que o ramo catódico da curva é deslocado para valores de potenciais mais negativos e a densidade de corrente, em relação ao potencial de corrosão, diminui.

Figura 12 - Modificação do potencial de corrosão e da corrente de corrosão pela presença de um inibidor catódico



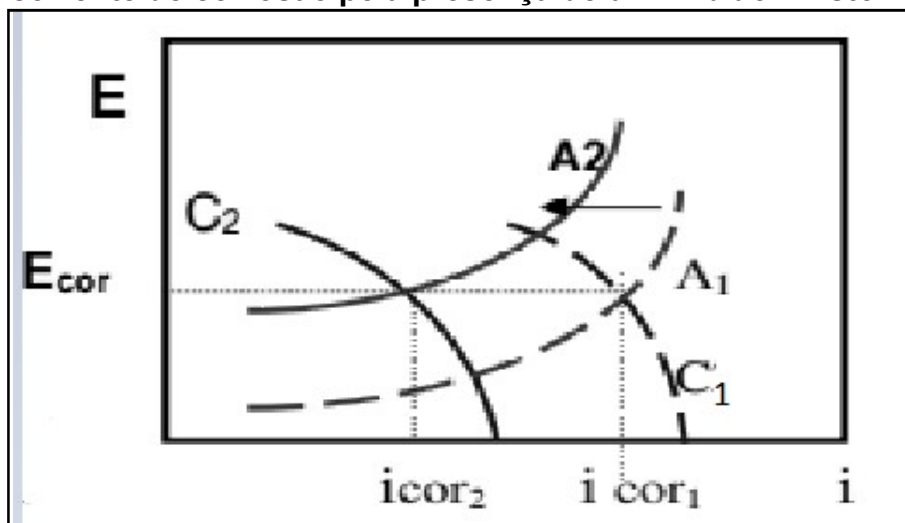
Fonte: apostila de inibidores, disponível em:
http://www.ufrgs.br/lapec/wa_files/inibidores_20_20apost.pdf

2.4.2.3 Inibidores mistos

Os mistos, como o próprio nome sugere, atuam tanto nas áreas anódicas quanto catódicas. São usados com o intuito de obter tratamentos mais eficientes e econômicos, ao se misturar inibidores dos dois tipos. Dentre os mais usados em sistemas de resfriamento estão: polifosfato-fosfanato-zinco, fosfanato zinco-azóis e fosfino carboxílico-fosfonato-zinco-azóis.

A figura 13 expõe o caráter do inibidor misto (2) em relação ao meio sem inibidor (1). É possível notar que o potencial de corrosão não é afetado pela presença do inibidor e ambos os ramos, catódicos e anódicos, são modificados.

Figura 13 - Modificação do potencial de corrosão e da corrente de corrosão pela presença de um inibidor misto



Fonte: apostila de inibidores, disponível em:
http://www.ufrgs.br/lapec/wa_files/inibidores_20_20apost.pdf

2.4.3 Específicos para cobre

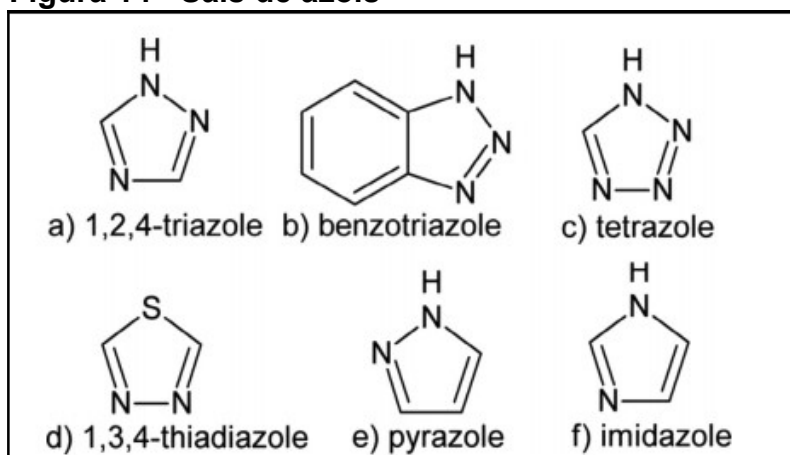
Geralmente, são usados inibidores de origem orgânica para a proteção do cobre, visto que eles possuem uma eficiência de inibição à corrosão superior a de compostos inorgânicos. Por esse motivo, compostos de azóis (tiazol, benzotriazol, imidazol e tiadiazol), aminas, bases de Schiff e compostos de aminoácidos podem ser apontados como os mais importantes inibidores de corrosão utilizados para a proteção do cobre como está ilustrado pela Figura 14 (FATEH, ALIOFKHAZRAEI E REZVANI, 2017).

Ainda segundo Fateh, Aliofkhazraei e Rezvanian (2017), a estrutura molecular do inibidor de corrosão desempenha um papel fundamental nas interações do inibidor com a superfície metálica. No caso dos azóis, por exemplo, a presença do heteroátomo na estrutura do inibidor como um centro de sítios de adsorção promove a troca de elétrons entre o inibidor e o cobre (que possui um orbital d vazio). Além disso, essa interação desenvolve várias ligações entre a superfície metálica e o inibidor, aumentando a possibilidade da formação de uma ligação mais forte (do tipo química) entre eles.

A eficiência e a habilidade do inibidor em proteger a superfície do cobre dependem de vários fatores como: crescimento do filme protetor formado por

polimerização na superfície metálica; interações entre orbitais π e ligações de Van der Waals; força de ligação entre os heteroátomos e a superfície metálica. Além dos fatores relacionados ao meio que já foram citados anteriormente (RAMESH; RAJESWARI, 2005).

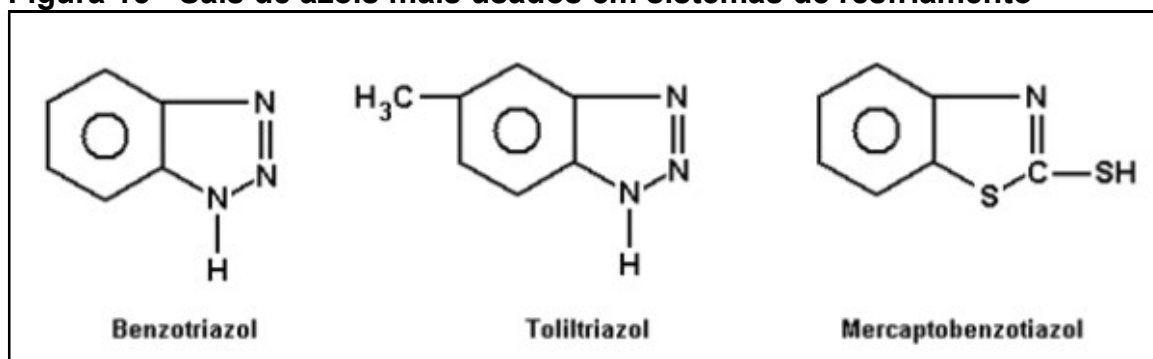
Figura 14 - Sais de azóis



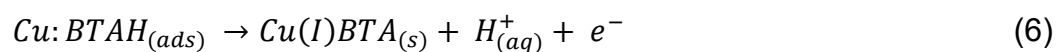
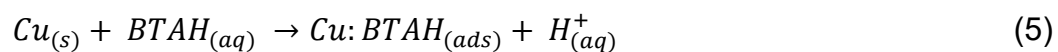
Fonte: FATEH et al,2017.

Os sais de azóis mais usados são os sais de benzotriazol, toliltriazol e mercaptobenzotriazol destacado na Figura 15. O provável mecanismo de proteção é a complexação do cobre, que por adsorção, forma um filme protetor na superfície do metal. (DANTAS, 1988). Entretanto, esse filme só se forma em meio alcalinos ou neutros, visto que, em meio ácido, ocorre a dissolução do filme formado. A reação de complexação para o benzotriazol está representada pelas equações (5) e (6) (FATEH, ALIOFKHAZRAEI E REZVANIAN, 2017).

Figura 15 - Sais de azóis mais usados em sistemas de resfriamento



Fonte: Dantas,1988



Segundo Dantas (1988), em água de refrigeração com pH 8 e na presença de cloro e seus derivados, o toliltriazol apresenta uma melhor eficiência de inibição para latão quando comparado ao benzotriazol e quando ambos são quimissorvidos na superfície do metal, o filme do inibidor é resistente ao cloro e seus derivados .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Preparo das soluções

As soluções foram preparadas a partir da água da rede de abastecimento, a fim de simular a água de resfriamento, e então, duas soluções-base foram feitas: uma contendo 250 ppm de cloreto de sódio e a outra com 500 ppm do mesmo sal. As soluções com inibidor foram feitas com a adição de AZ 8101[®] nas concentrações de 5, 10 e 25 ppm às soluções-base. A escolha das concentrações foi baseada na indicação do fabricante, cuja utilização em fábricas tem dosagem do referido inibidor entre 5 e 25 ppm e apresentou as medidas de pH conforme a Tabela 1.

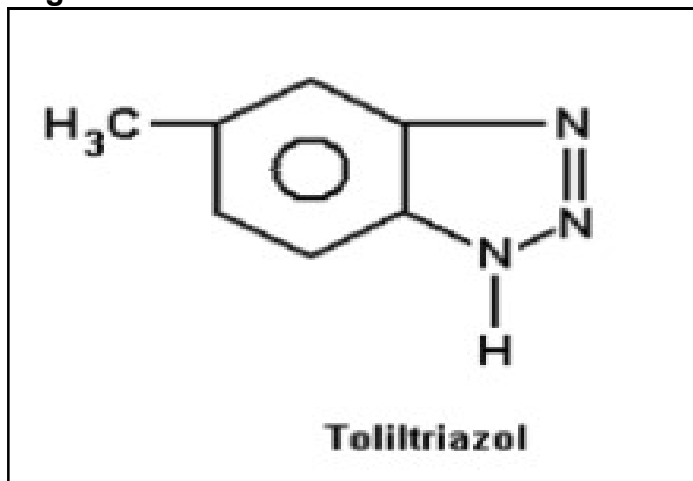
Tabela 1 - pH das soluções

Meio	5 ppm	10 ppm	25 ppm	Branco
250 ppm Cl	10,20	10,75	11,08	7,84
500 ppm Cl	11,05	11,16	11,40	7,96

Fonte: Autor

O inibidor AZ 8101[®] que será analisado neste trabalho tem formulação química de 4(ou 5)-metil-1H-benzotriazolida de sódio (ou 5-toliltriazol), sua fórmula química está representada na Figura 16 e a Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ) está detalhada no Anexo A.

Figura 16 - Estrutura molecular do toliltriazol



Fonte: Dantas (1988)

3.2 Preparo dos corpos de prova

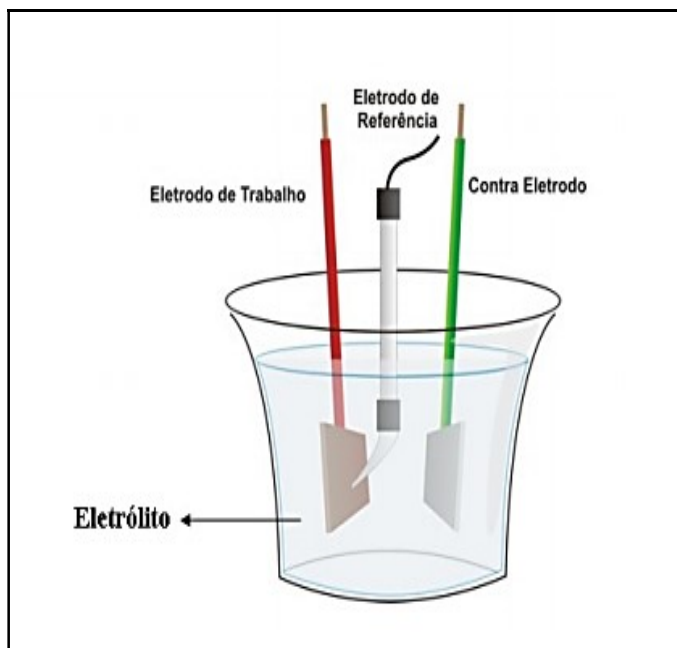
Para os ensaios eletroquímicos, o material metálico utilizado na confecção dos corpos de prova foi um tarugo de cobre de 1,6 cm de diâmetro que foi cortado e embutido em resina epóxi e conectado a um fio do mesmo material. A área superficial exposta dos corpos de prova foi de aproximadamente $0,60 \text{ cm}^2$, a superfície metálica foi lixada em uma poltriz (Arotec), utilizando lixas d'água de duas granulometrias: 400 e 600 *mesh*. Após este processo, os corpos de prova foram lavados com água destilada para retirar qualquer resíduo proveniente da lixa e a superfície metálica foi seca com jato de ar quente.

Para os ensaios gravimétricos de perda de massa, foram usados corpos cilíndricos do mesmo tarugo de cobre utilizado nos ensaios eletroquímicos com área superficial média de $9,2 \text{ cm}^2$.

3.3 Ensaios eletroquímicos

Todas as medidas eletroquímicas foram realizadas em uma célula convencional de três eletrodos, ilustrada na Figura 17: o cobre foi usado como eletrodo de trabalho, o eletrodo de $\text{Ag}_{(s)}/\text{AgCl}_{(s)}/\text{Cl}^{-}_{(aq)}$ (KCl saturado) como referência e uma placa de platina como contra eletrodo. Os eletrólitos usados foram as soluções-base acrescidas dos inibidores nas concentrações citadas e os experimentos foram feitos em duplicata, com a solução estagnada, naturalmente aerada e a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. As medidas eletroquímicas foram realizadas em Potenciostato/galvanostato modelo PGSTAT30 (*Autolab, Metrohm-Eco Chemie*), com coleta de dados feita por meio do software Nova v.1.11.2.

Figura 17 - Esquema de célula eletroquímica de 3 eletrodos



Fonte: Material didático disponível em:

https://www.maxwell.vrac.puc.rio.br/14472/14472_2.PDF

Inicialmente, o monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP) foi avaliado durante 1800s para verificação e estabilização da dupla camada elétrica formada na interface metal-solução.

Após a estabilização, foi feita a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) em que a faixa de frequência aplicada foi de 40kHz até 6mHz, com sinal de 10 mV de amplitude de perturbação.

Ao finalizar o ensaio de impedância, a curva de polarização linear foi traçada com velocidade de varredura igual a 1mV s^{-1} na direção de -0,300V para 0,300V com relação ao potencial de circuito aberto.

A eficiência de redução da corrente foi medida por meio da média das duplicatas comparando-a com uma amostra sem inibidor, conforme a equação (7):

$$n = (i_o - i) \times 100\% \quad (7)$$

onde

i_o é a densidade de corrente das soluções-base sem inibidor

e i é a densidade de corrente das soluções com inibidor.

A eficiência de inibição da corrosão pelo método da impedância é calculado por meio da estimativa do R_p (resistência de polarização), que é estimada pelo software Nova v.1.11.2 e usada na equação (8):

$$IE (\%) = \frac{R_p - R_p^o}{R_p} \times 100\% \quad (8)$$

onde

R_p é a resistência de polarização do inibidor e

R_p^o é a resistência de polarização da solução sem inibidor.

3.4 Ensaio de Perda de massa

Os corpos de prova foram lixados manualmente com lixa d'água de 400 *mesh*, lavados, secos e imersos em solução de H_2SO_4 0,1 M por 5 min a fim de remover quaisquer impurezas presentes na superfície conforme a norma ASTM G1 03 (2007), em seguida, os corpos foram lavados com água destilada, desengordurados com acetona, secos e pesados em balança analítica com precisão de 0,1 mg.

Dois corpos de prova foram imersos na solução corrosiva por um determinado tempo na ausência e presença dos inibidores nas concentrações já mencionadas. Os corpos de prova foram removidos, lavados com água destilada, imersos novamente em solução de H_2SO_4 0,1 M por 5 min, enxaguados com água e acetona, e secos com jato de ar quente e novamente pesados. A eficiência de inibição e a taxa de corrosão foram calculadas por meio das equações (9) e (10):

$$n = \frac{(W_o - W)}{W_o} \times 100\% \quad (9)$$

Onde

W_o é a perda de massa após imersão na ausência de inibidor

W é a perda de massa após imersão na presença de inibidor.

$$CR \left(\frac{mm}{ano} \right) = 87,6 * \frac{\Delta W}{A_{pt}} \quad (10)$$

onde

ΔW é a perda de massa das amostras após imersão,

A é a área superficial do corpo de prova (cm^2),

ρ é a massa específica do cobre que é $8,92 \text{ g/cm}^3$,

t é o tempo de duração do ensaio (h).

3.5 Isotermas de adsorção

De modo a avaliar o processo de adsorção dos inibidores sobre a superfície metálica, foram traçadas as isotermas de adsorção. Elas podem ser determinadas por meio da avaliação da cobertura superficial (θ) em função da concentração do inibidor de corrosão (C), obtendo-se a melhor correlação entre os dados extraídos e os modelos isotérmicos propostos. A cobertura da superfície pode ser determinada pelos métodos de perda de massa, polarização e impedância, de acordo com a equação (11):

$$\theta = \frac{(W - W_o)}{W_o} = \frac{R_{t(inib)} - R_t}{R_t} = \frac{(i_{corr} - i_{corr,inib})}{i_{corr}} \quad (11)$$

Onde

W_o é a perda de massa após imersão na ausência de inibidor;

W é a perda de massa após imersão na presença de inibidor;

$R_{t(inib)}$ é a resistência de polarização do inibidor;

R_t é a resistência de polarização da solução sem inibidor;

i_{corr} é a densidade de corrente das soluções-base sem inibidor;

$i_{corr,inib}$ é a densidade de corrente das soluções com inibidor.

3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

Análises do cobre puro (sem ser submetido a nenhum meio) e do cobre após os ensaios eletroquímicos no meio sem inibidor de 500 ppm Cl^- e com 5 ppm de $\text{AZ 8101}^{\text{®}}$ (em 500 ppm Cl^-) foram avaliados com o equipamento *Quanta 450-FEG (FEI)* da Central Analítica da UFC.

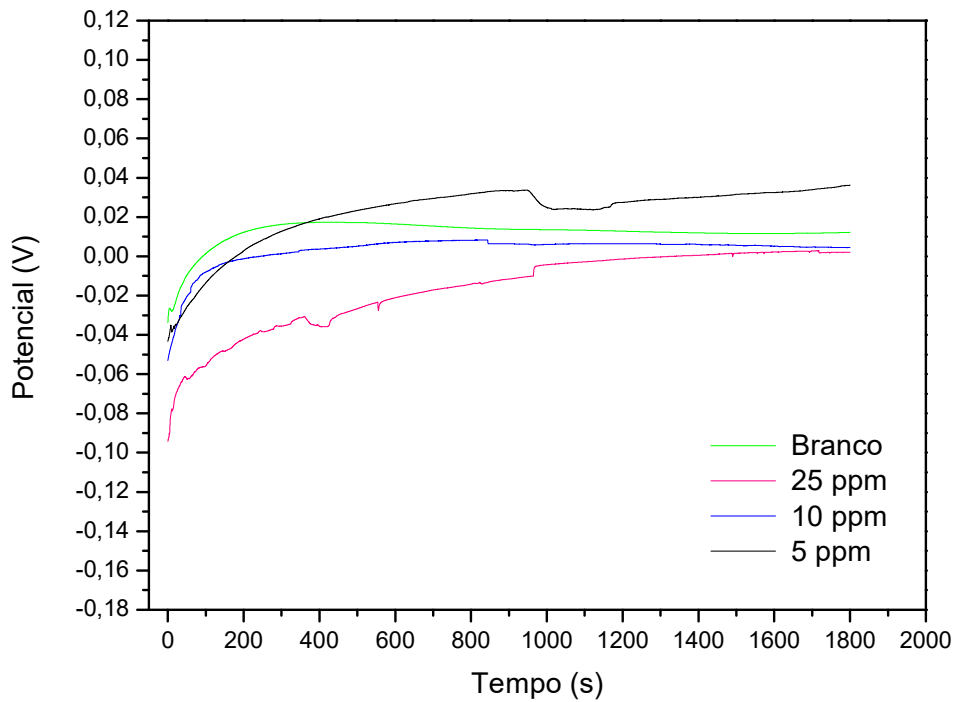
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Potencial de circuito aberto (OCP)

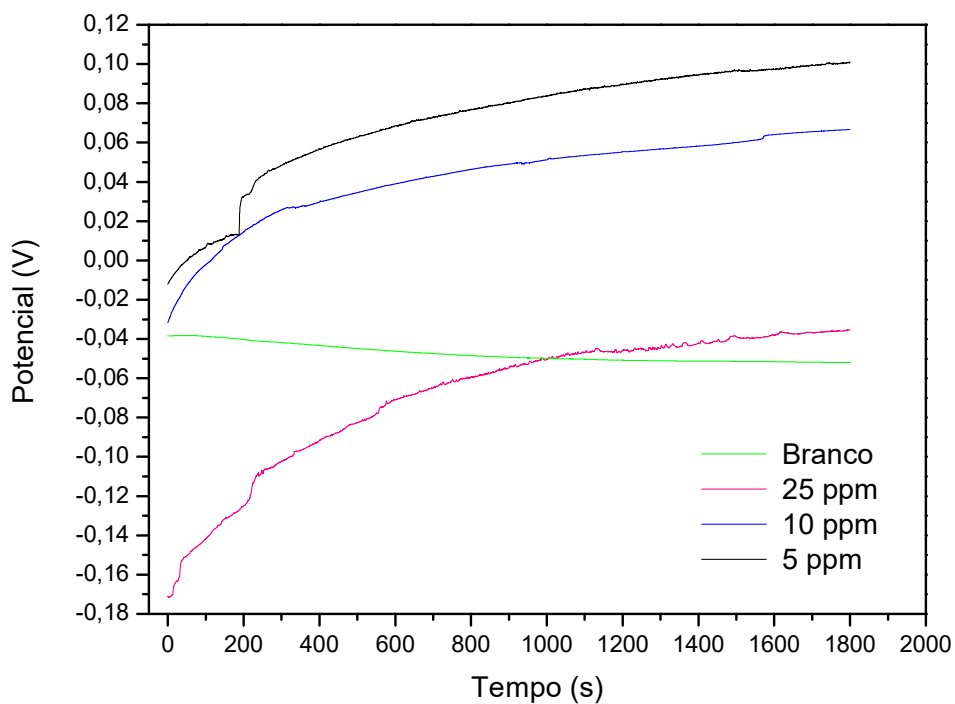
Os resultados expressos nas Figuras 18 e 19 mostram os comportamentos das curvas de OCP para os dois meios estudados. Tasić et al (2018) estudaram o comportamento do inibidor cefradina⁷ em meio de NaCl e obtiveram um comportamento semelhante: o deslocamento das curvas com inibidor para valores mais positivos de potencial. Esse comportamento pode ser associado à adsorção de moléculas inibidoras nos sítios ativos do metal ou à formação de um filme protetor. Ainda segundo esses autores, o desvio da solução sem inibidor para valores mais negativos (pequeno declive) indica a dissolução do filme de óxido, que é formado no início da imersão, e formação da camada de CuCl, conforme a equação (3) citada anteriormente.

Convém destacar que o aumento da concentração de inibidor no meio, não proporcionou uma variação significativa de potencial, fato também observado por Tasić et al (2018) que pode estar relacionado ao fato do inibidor ser do tipo misto.

⁷Cefradina: ácido (6R, 7R) -7 - [[(2R) -2-amino-2-ciclo-hexa-1,4-dien-1- ilacetil] amino] -3-metil-8-oxo-5-tia-1-azobicyclo [4.2.0] oct-2-eno-2-carboxílico; Derivado de azóis.

Figura 18 - Curvas de OCP para o meio de 250 ppm de Cl^- 

Fonte: Autor, 2018.

Figura 19 - Curvas de OCP para o meio de 500 ppm de Cl^- 

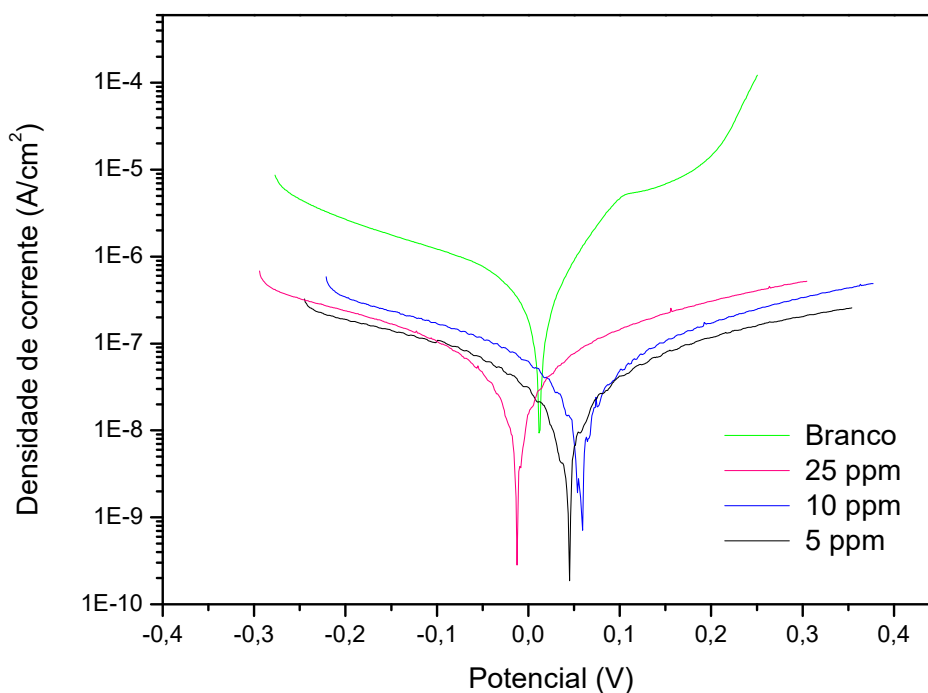
Fonte: Autor, 2018.

Esse ensaio é importante para garantir um estado inicial de estabilização de potencial da interface metal-solução, o que pode ser observado nos gráficos acima.

4.2 Polarização linear (CP)

A Figura 20 mostra as curvas de polarização para as diferentes concentrações de inibidor que estão sendo analisadas, é possível notar que as curvas são deslocadas para menores valores de densidade de corrente, o que confirma a atuação do inibidor em reduzir o processo corrosivo. Além disso, é de fácil observação que tanto o ramo catódico quanto o anódico são alterados pela presença do inibidor, o que ratifica a proposição anterior de que o inibidor é do tipo misto. Esse mesmo comportamento, de inibidor tipo misto, foi observado por Finšgar et al. (2016) ao analisar o toliltriazol, principal constituinte do AZ 8101[®], em meio ácido, para o aço comercial.

Figura 20 - Polarização para o meio de 250 ppm de Cl⁻

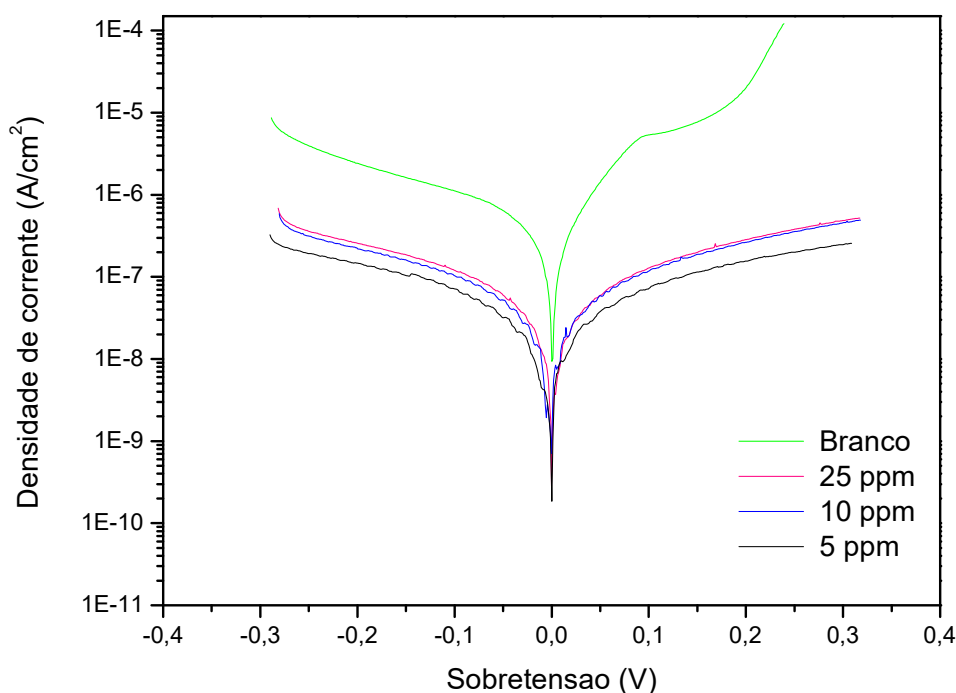


Fonte: Autor, 2018.

Na Figura 21 são apresentados os gráficos das curvas de sobretensão, a fim de facilitar a visualização da extensão, ou magnitude, da polarização. Foi observado que a redução do valor da densidade de corrente elétrica em relação às diferentes concentrações foi quase imperceptível, porém, foi possível notar que a concentração de 5 ppm foi um pouco superior às demais.

Para quantificar as eficiências de redução de corrente, foi usado o Método da extrapolação de Tafel e os resultados obtidos das médias das duplicatas estão exibidos na Tabela 2. Baseado nesta, foi verificada a diminuição da densidade de corrente e da taxa de corrosão com a redução da concentração de inibidor, atingindo a eficiência máxima de 99,54% para 5 ppm de inibidor.

Figura 21 - Sobretensão para o meio de 250 ppm Cl^-



Fonte: Autor, 2018.

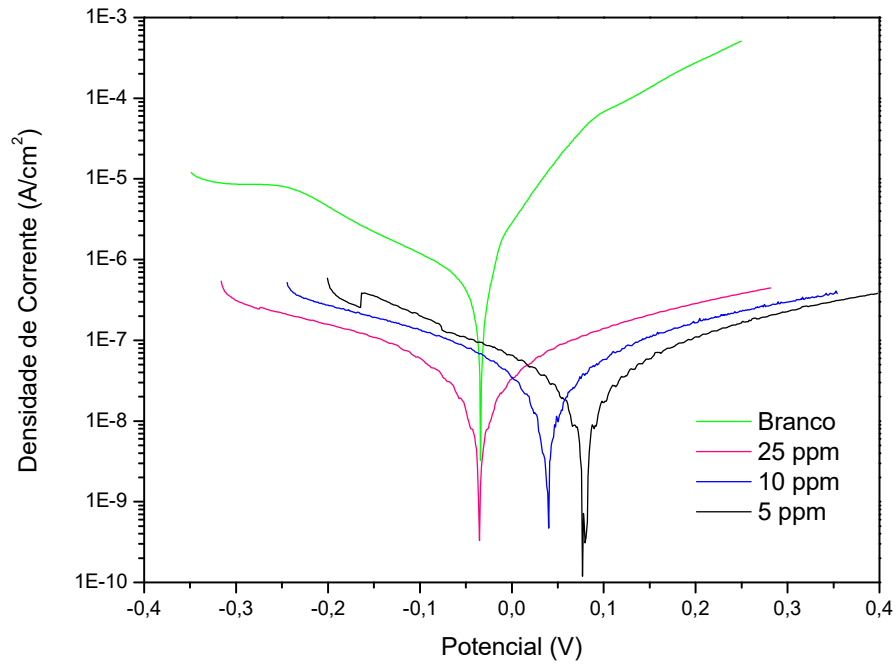
Tabela 2 - Parâmetros eletroquímicos da oxidação do cobre em meio de 250 ppm Cl⁻ com adição de diferentes concentrações do inibidor AZ 8101

Parâmetro	Solução de 250 ppm Cl ⁻			
	Branco	25 ppm	10 ppm	5 ppm
ba (V/dec)	0,2485	0,0783	0,0249695 ± 0,0098	0,0250
bc (V/dec)	0,0848	1,3430	0,0187885 ± 0,0075	0,0153
E corr, calc (mV)	11,86	-28,33	29,24	29,39
j corr (nanoA/cm ²)	444,02	27,33 ± 3,4690	4,4882 ± 1,9897	2,05485 ± 0,4530
i corr (nanoA)	234,44	15,48	2,43	1,12
CR (mm/ano)	1,06x10 ⁻²	6,54x10 ⁻⁴	1,07x10 ⁻⁴	4,92x10 ⁻⁵
η (%)		93,84	98,99	99,54

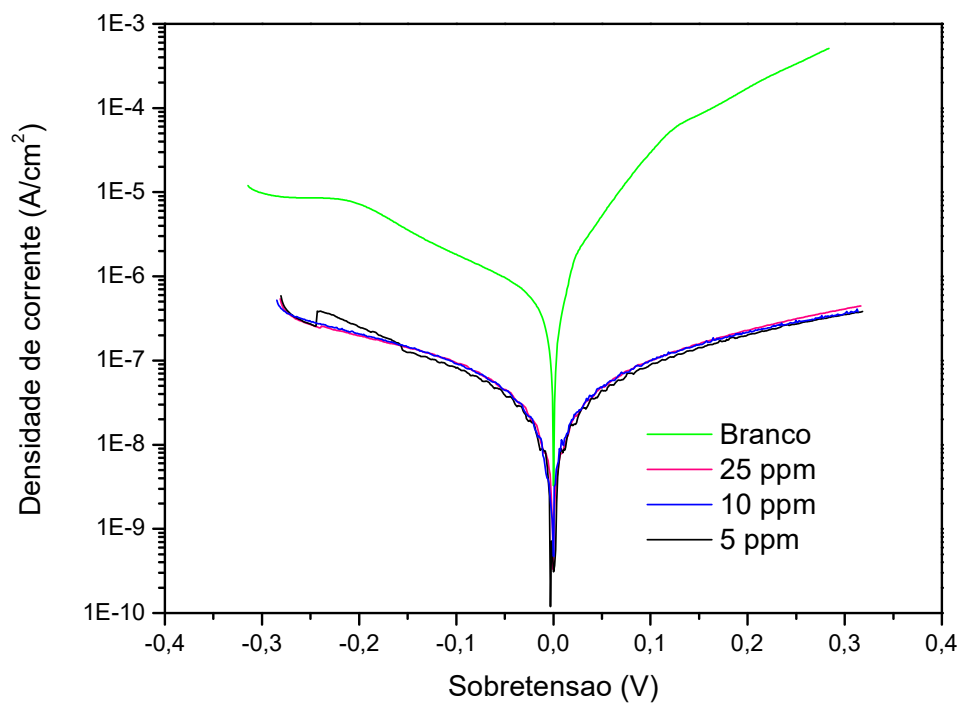
Fonte: Autor, 2018.

Legenda: ba/bc: declives de Tafel; Ecorr, calc: Potencial de corrosão; j corr: densidade de corrente; i corr: corrente elétrica; CR: taxa de corrosão; η: eficiência de redução de corrente

Os mesmos gráficos foram plotados para o meio de 500 ppm de Cl⁻ e um comportamento similar ao meio de 250 ppm Cl⁻ foi observado, como pode ser visto nas Figuras 22 e 23. Tasić et al (2018), que estudou derivados de azóis em cobre, defende que essas mudanças na densidade de corrente de corrosão são consequência da adsorção de moléculas inibidoras na superfície do cobre e da formação de um filme protetor. A afirmação de que o AZ 8101[®] é um inibidor do tipo misto é reforçada pela alteração dos declives de Tafel catódicos e anódicos (bc e ba) mostrados na Tabela 3.

Figura 22 - Polarização para o meio de 500 ppm Cl^- 

Fonte: Autor, 2018

Figura 23 - Sobretensão para o meio de 500 ppm Cl^- 

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 3 - Parâmetros eletroquímicos da oxidação do cobre em meio de 500 ppm Cl⁻ com adição de diferentes concentrações do inibidor AZ 8101

Parâmetro	Solução de 500 ppm de Cl ⁻			
	Branco	25 ppm	10 ppm	5 ppm
ba (V/dec)	0,0905	0,0569	0,0196	0,0179
bc (V/dec)	0,0423	0,0276	0,0123	0,0270
E corr, calc (V)	-183,43	-45,01	47,42	81,85
j corr (nA/cm ²)	357,28	5,4422 ± 1,283	2,6396 ± 0,6863	2,65776 ± 1,9661
i corr (nA)	208,75	3,34	1,29	1,44
CR (mm/ano)	8,55x10 ⁻³	1,30x10 ⁻⁴	6,32x10 ⁻⁵	6,36x10 ⁻⁵
η (%)		98,48	99,26	99,26

Fonte: Autor, 2018.

Pela análise da Tabela 3 é evidente a redução da densidade de corrente e da taxa de corrosão com a adição de inibidor. Além disso, similarmente ao meio de 250 ppm Cl⁻, as eficiências são muito próximas umas às outras, a máxima obtida foi de 99,26% de eficiência para 5 e 10 ppm de AZ 8101[®].

A princípio, o esperado era que o aumento da concentração de inibidor, aumentasse a eficiência de corrosão, porém 5 ppm mostrou ser a melhor concentração (99%) para ambos os meios, sendo considerada uma concentração crítica, acima da qual não há ganho em eficiência.

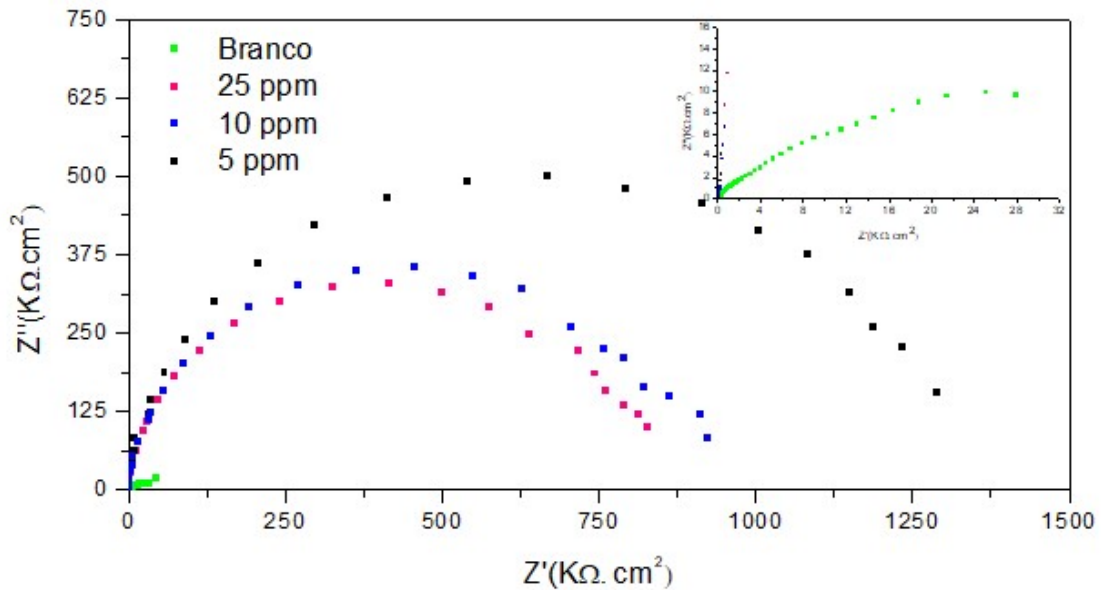
4.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)

Os diagramas de Nyquist e de Bode-Impedância para o meio de 250 ppm de Cl⁻ estão representados pelas Figuras 24 e 25. Pela análise do primeiro diagrama, as curvas de impedância exibem apenas um único arco capacitivo, o que indica que a corrosão do cobre é controlada pelo processo de transferência de carga (MURALISANKAR, 2017). A impedância (Z) está associada à resistência que a solução em contato com a superfície metálica impõe à transferência de carga, ou seja, à passagem de corrente elétrica e, conseqüentemente, o quanto a superfície metálica, na presença do inibidor, resiste à corrosão. Desse modo, à medida que a eficiência de inibição de corrosão aumenta, o diâmetro e a área dos semicírculos aumentam também (FATEH, ALIOFKHAZRAEI E REZVANIAN, 2017).

Conforme a Figura 24, é evidente o crescimento dos semicírculos com a adição do inibidor, de modo que, sem a ampliação do gráfico, seria difícil visualizar a amostra sem inibidor, mostrando que, de fato, ele desacelera o processo corrosivo.

Convém destacar que, em concordância com os ensaios de polarização, ao ser aumentada a concentração, a área do semicírculo apresenta uma pequena diminuição (a eficiência de inibição diminui), e, novamente, a concentração de 5 ppm é a mais eficiente.

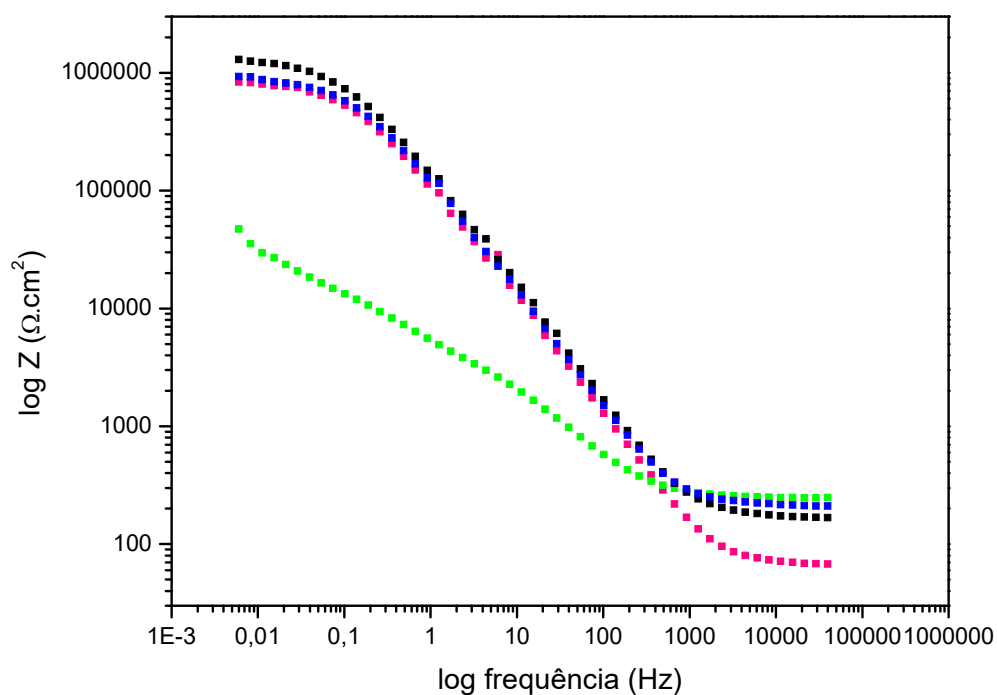
Figura 24 - Diagrama de Nyquist para o meio de 250 ppm Cl^-



Fonte: Autor, 2018.

A Figura 25 apresenta uma representação bastante comum, chamada Bode – impedância, que relaciona o parâmetro Z com a faixa de frequências aplicadas. De forma coerente com o diagrama de Nyquist, ele mostra que a presença do inibidor aumenta a impedância e, conseqüentemente, a resistência à corrosão.

Figura 25 - Diagrama Bode - Impedância para o meio de 250 ppm Cl⁻



Fonte: Autor, 2018

Tabela 4 - Parâmetros de EIS para o meio de 250 ppm Cl⁻

Parâmetro	Branco	25 ppm	10 ppm	5ppm
CPE.YO (μF)	122,33	0,99	0,96	0,95
Rp.R ($\text{K}\Omega$)	53,53	759,33	1089,96	1285,78
Rs.R (Ω)	0,08	0,00	0,00	0,00
Rpt($\text{K}\Omega$)	53,62	759,33	1089,96	1285,78
η (%)		92,94	95,08	95,83

Fonte: Autor, 2018.

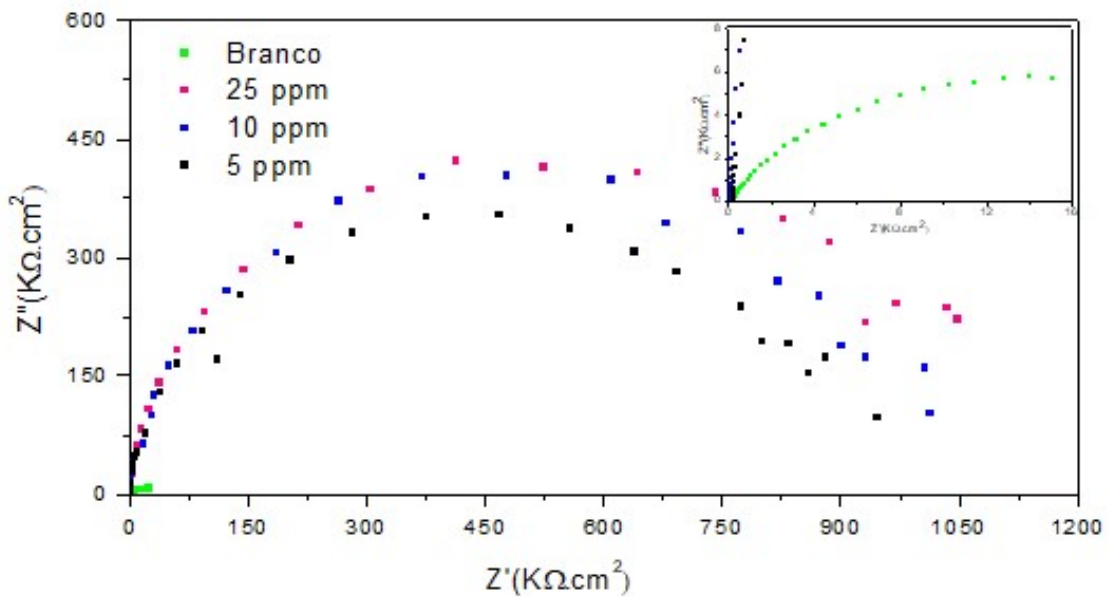
Os ensaios de impedância fornecem parâmetros importantes que ajudam a avaliar a corrosão, apresentados na Tabela 4. Dentre os parâmetros tem-se:

- CPE é a capacitância da dupla camada,
- Rp.R é a resistência à polarização,
- Rs.R é a resistência da solução,
- Rpt é a resistência total e
- η é a eficiência de inibição.

A diminuição do valor do CPE sugere que o inibidor cobriu (adsorveu) a superfície metálica (FATEH, ALIOFKHAZRAEI E REZVANIAN, 2017). Além disso, é possível notar o aumento da resistência (R_p) com adição de inibidor no meio. Quantitativamente a concentração de 5 ppm apresenta a melhor eficiência de inibição.

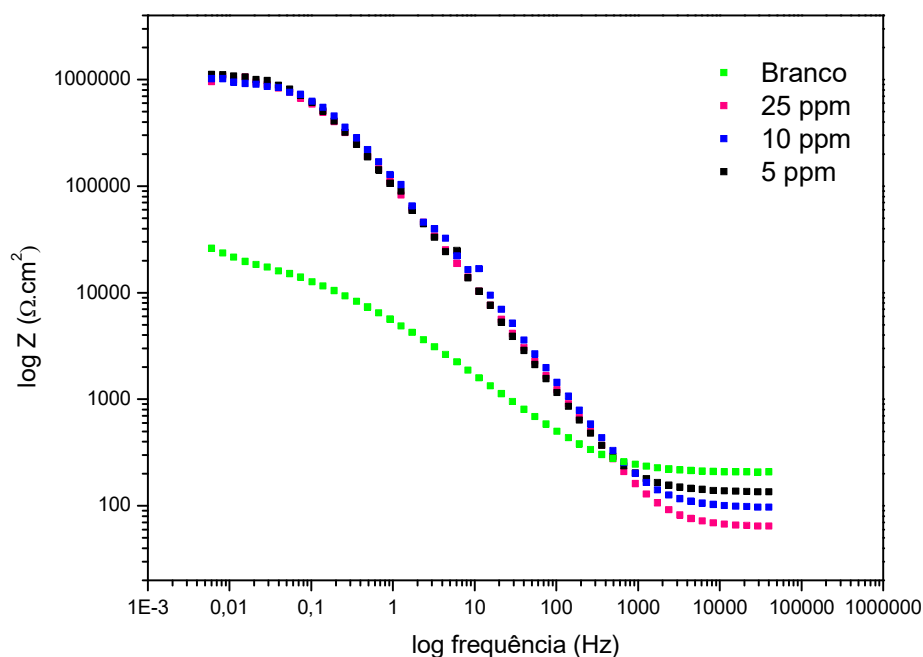
As Figuras 26 e 27 ilustram os resultados para o meio de 500 ppm, onde é possível observar um comportamento semelhante ao de 250 ppm, com um aumento significativo do diâmetros e da área dos semicírculos no diagrama de Nyquist e um aumento acentuado de Z no gráfico de Bode, significando uma maior resistência à corrosão. No entanto, observa-se que a variação da concentração praticamente não tem influência no comportamento dos gráficos, sugerindo que as eficiências de inibição são praticamente iguais.

Figura 26 – Diagrama de Nyquist para o meio de 500 ppm Cl^-



Fonte: Autor, 2018.

Figura 27 - Diagrama Bode - Impedância para o meio de 500 ppm Cl⁻



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 5 mostra os parâmetros obtidos nos ensaios e, por meio deles, é possível confirmar que as eficiências de inibição não apresentam diferenças significativas.

Tabela 5 - Parâmetros de EIS para o meio de 500 ppm Cl⁻

Parâmetro	Branco	25 ppm	10 ppm	5ppm
CPE.Y0	42,82	1,05	0,81	0,79
Rp.R (KΩ)	23,48	1133,50	979,67	947,81
Rs.R (Ω)	0,17	0,03	0,18	0,00
Rpt	23,65	1133,54	979,85	947,81
η (%)		97,91	97,59	97,50

Fonte: Autor, 2018.

4.4 Perda de massa

4.4.1 Solução de 250 ppm de Cl^-

Os ensaios de perda de massa para o meio contendo 250 ppm de Cl^- foram realizados durante 7 dias, porém nenhum corpo de prova apresentou perda de massa. Então, os ensaios foram repetidos e as amostras foram deixadas em imersão por 28 dias: os corpos de prova imersos em soluções contendo inibidor nas concentrações de 10 e 25 ppm não apresentaram variação de massa, o que impossibilitou o cálculo da eficiência do inibidor, nem sinais perceptíveis de corrosão; Já o meio sem inibidor apresentou uma perda de massa de 0,0071 g e sinais de corrosão caracterizados pela formação de uma película escura na superfície do cobre como pode ser visto na figura 28.

Figura 28 - Registro fotográfico dos corpos de prova após imersão no meio de 250 ppm de Cl^- por 28 dias



Fonte: Autor, 2018.

4.4.2 Solução de 500 ppm de Cl^-

Os ensaios de perda de massa para os meios contendo 500 ppm de Cl^- foram realizados por um período de 14 dias, os corpos de prova contendo inibidor na concentração de 10 e 25 ppm não apresentaram variação de massa durante esse intervalo de tempo, o que impossibilitou o cálculo da eficiência do inibidor. No caso do meio sem inibidor, os corpos de prova apresentaram uma perda de massa praticamente insignificante de 0,0009 g. Os registros fotográficos dos materiais usados após a análise estão expostos na Figura 29, em que é possível observar sinais de corrosão caracterizados pelo filme escuro formado na superfície do cobre

imerso no meio sem inibidor (branco). As demais amostras não apresentaram nenhum sinal visível de corrosão.

Figura 29 - Registro fotográfico dos corpos de prova após imersão no meio de 500 ppm de Cl⁻ por 14 dias



Fonte: Autor, 2018.

4.5 Isotermas de Adsorção

O mecanismo que melhor descreveu o comportamento de adsorção do inibidor AZ 8101[®] foi a isoterma de Langmuir, como bem ilustram as Figuras 30 e 31. A isoterma de Langmuir, que tem um bom ajuste com dados experimentais, pode ser representada pela equação (12):

$$K_{ads}C = \frac{\theta}{1-\theta} \quad (12)$$

onde

K_{ads} é a constante de equilíbrio de adsorção

C é a concentração de inibidor

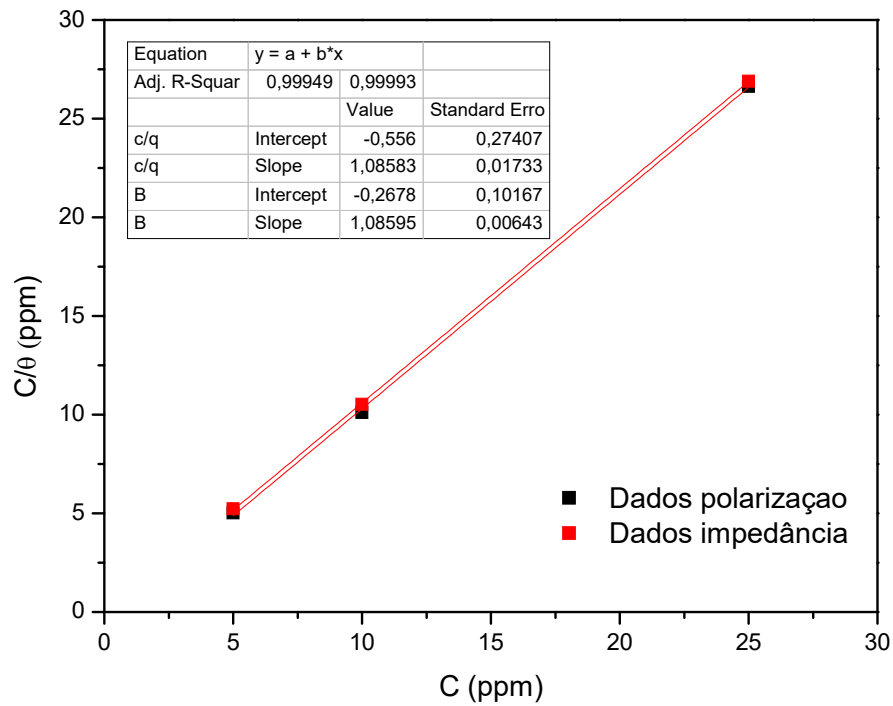
θ é cobertura superficial

Essa equação pode ser rearranjada para facilitar a análise gráfica conforme a equação (13):

$$\frac{C}{\theta} = C + \frac{1}{K} \quad (13)$$

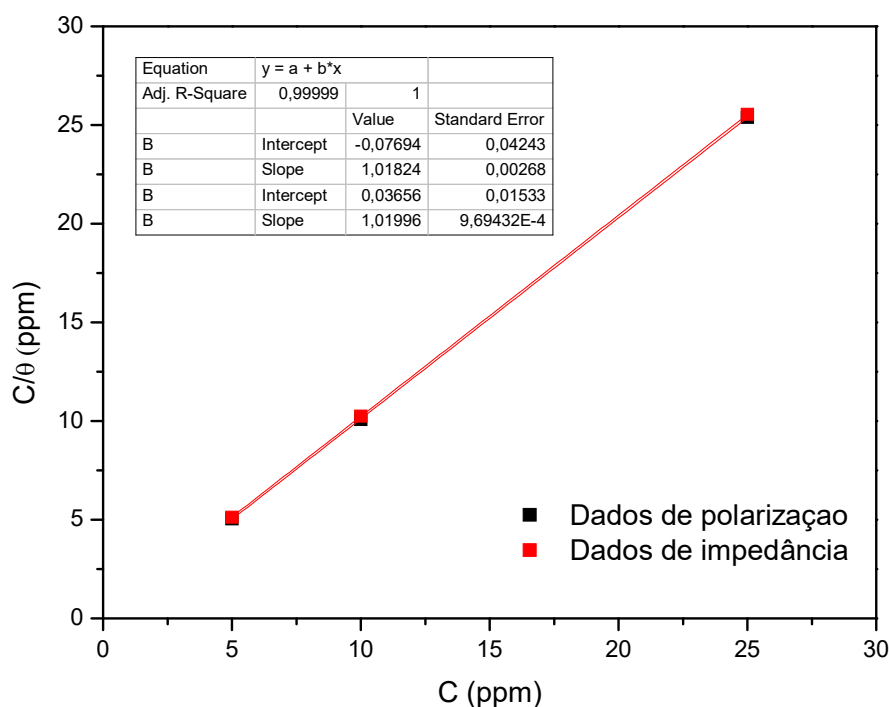
Desse modo, ao se plotar um gráfico de $\frac{C}{\theta}$ por C , se ele apresentar um comportamento linear, é possível admitir que esse inibidor obedece ao mecanismo de adsorção Langmuir.

Figura 30 - Isotherma de Langmuir para o meio de 250 ppm de Cl^-



Fonte: Autor, 2018.

Figura 31 - Isoterma de Langmuir para o meio de 500 ppm de Cl^-



Fonte: Autor, 2018.

Empiricamente, o modelo de Langmuir assume que a adsorção ocorre em uma monocamada (a camada adsorvida tem espessura de uma molécula) e a adsorção só pode ocorrer em um número finito (fixo) de locais definidos, que são idênticos e equivalentes, sem interação lateral e impedimento estérico entre as moléculas adsorvidas, mesmo em locais adjacentes. Desse modo, essa adsorção é considerada homogênea, em que cada molécula possui entalpia de adsorção e energia livre similares, visto que a tendência de adsorção é a mesma para todos os locais (FOO; HAMEED, 2010).

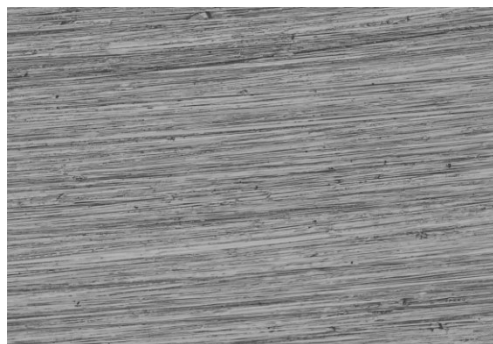
4.6 Análises de microscopia

4.6.1 Fotos de microscopia óptica

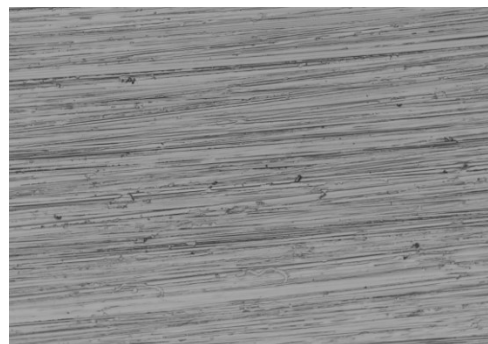
As superfícies das amostras com melhor desempenho dos meios de 250 e 500 ppm de Cl^- foram avaliadas por microscopia óptica o que está registrado nas figuras 32 a 35.

A figura 32 mostra o resultado obtido para o meio de 250 ppm de Cl^- na ausência de inibidor antes e após a realização dos ensaios eletroquímicos: é nítida a presença de vários pontos de corrosão (região mais escura).

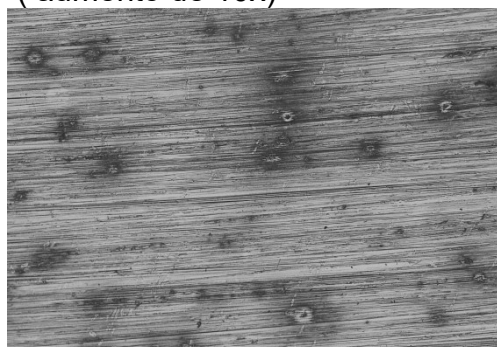
Figura 32 - Fotos dos ensaios eletroquímicos para o Branco (250 ppm de Cl^-)



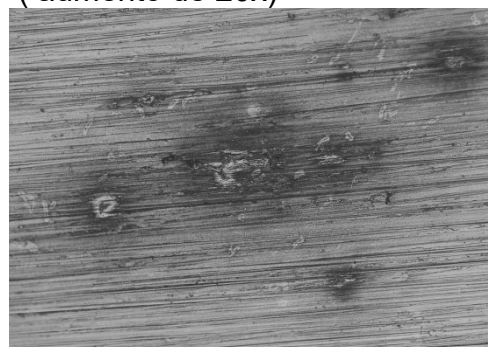
Ensaio do Branco (250 ppm Cl^-) – antes
(aumento de 10x)



Ensaio do Branco (250 ppm Cl^-) – antes
(aumento de 20x)



Ensaio do Branco (250 ppm Cl^-) – depois
(aumento de 10x)

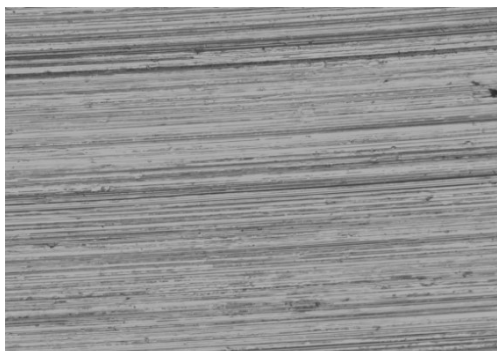


Ensaio do Branco (250 ppm Cl^-) – depois
(aumento de 20x)

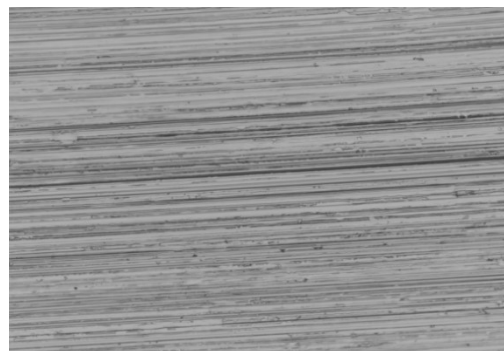
Fonte: Autor, 2018

Já a figura 33 retrata o resultado obtido para o meio de 250 ppm de Cl^- na presença de 5 ppm de inibidor antes e após a realização dos ensaios eletroquímicos: não é possível notar nenhum sinal expressivo de corrosão, confirmando o poder de proteção contra à corrosão já detectado nos ensaios eletroquímicos.

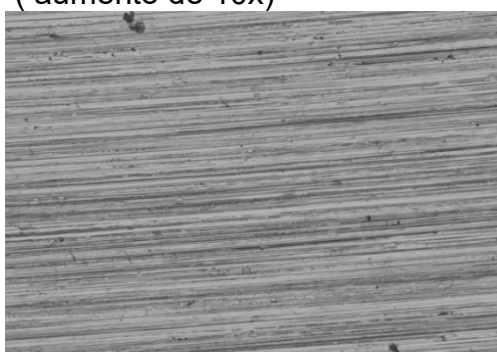
Figura 33 - Fotos dos ensaios eletroquímicos para 5 ppm de AZ 8101 para 250 ppm de Cl^-



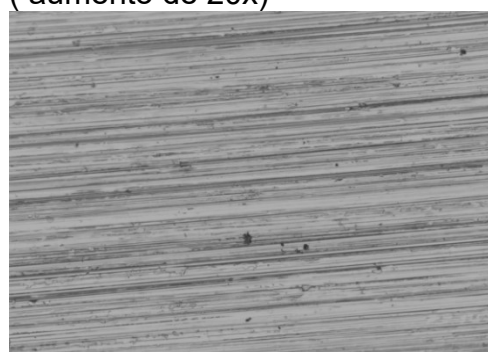
Ensaio de 5 ppm (250 ppm Cl^-) – antes
(aumento de 10x)



Ensaio de 5 ppm (250 ppm Cl^-) - antes
(aumento de 20x)



Ensaio de 5 ppm (250 ppm Cl^-) – depois
(aumento de 10x)

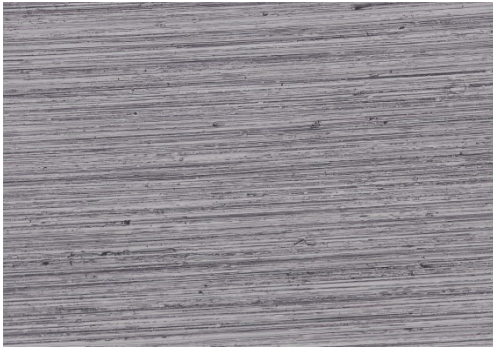


Ensaio de 5 ppm (250 ppm Cl^-) - depois
(aumento de 20x)

Fonte: Autor, 2018

A figura 34 mostra que, para o meio de 500 ppm de Cl^- e na ausência de inibidor, a superfície do cobre apresenta vários pontos localizados de corrosão, enquanto que a figura 35 mostra que a presença de 5 ppm de inibidor é capaz de neutralizar a ocorrência da corrosão.

Figura 34 - Fotos dos ensaios eletroquímicos para o Branco (500 ppm de Cl⁻)



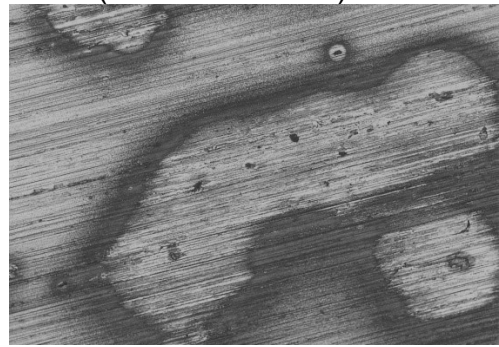
Ensaio de 5 ppm (500 ppm Cl⁻) – antes
(aumento de 10x)



Ensaio de 5 ppm (500 ppm Cl⁻) -
antes (aumento de 20x)



Ensaio de 5 ppm (500 ppm Cl⁻) – depois
(aumento de 10x)



Ensaio de 5 ppm (500 ppm Cl⁻) -
depois (aumento de 20x)

Fonte: Autor, 2018

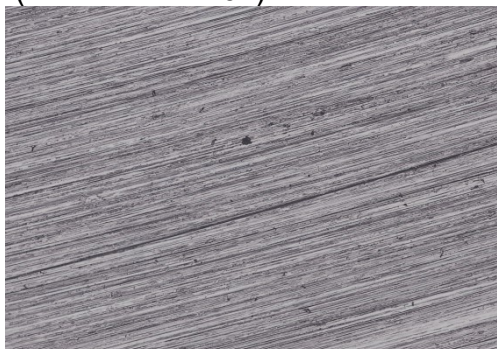
Figura 35 - Fotos dos ensaios eletroquímicos para 5 ppm de AZ 8101 para 500 ppm de Cl⁻



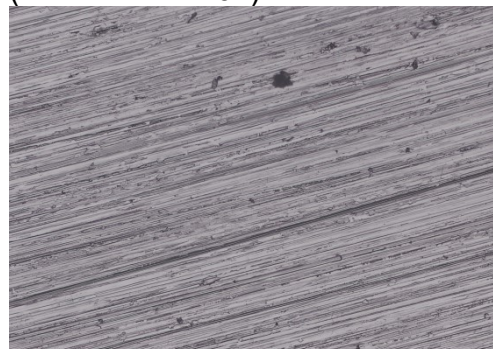
Ensaio de 5 ppm (500 ppm Cl⁻) – antes (aumento de 10x)



Ensaio de 5 ppm (500 ppm Cl⁻) - antes (aumento de 20x)



Ensaio de 5 ppm (500 ppm Cl⁻) – depois (aumento de 10x)



Ensaio de 5 ppm (500 ppm Cl⁻) - depois (aumento de 20x)

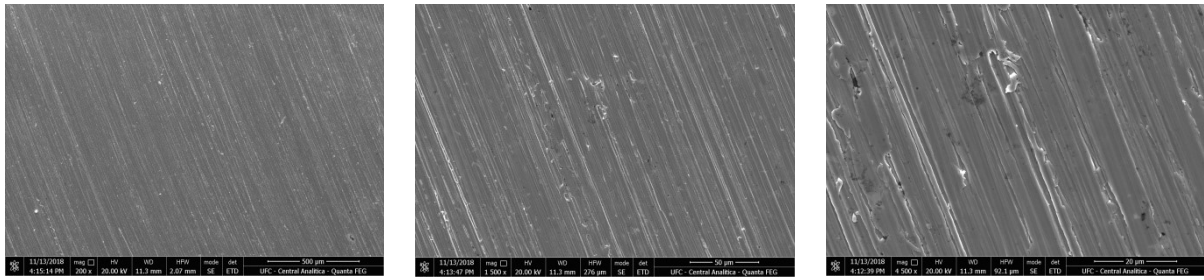
Fonte: Autor, 2018

4.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

- Amostra de Cobre puro

A fim de caracterizar o material em estudo, imagens de MEV e um mapa de EDS foram feitos na superfície metálica, o que está apresentado nas figuras 36 e 37. É possível notar que a superfície metálica é relativamente homogênea, apresentando poucas irregularidades, quanto à composição, segundo a EDS, o material contém somente cobre.

Figura 36 - MEV para amostra de cobre puro



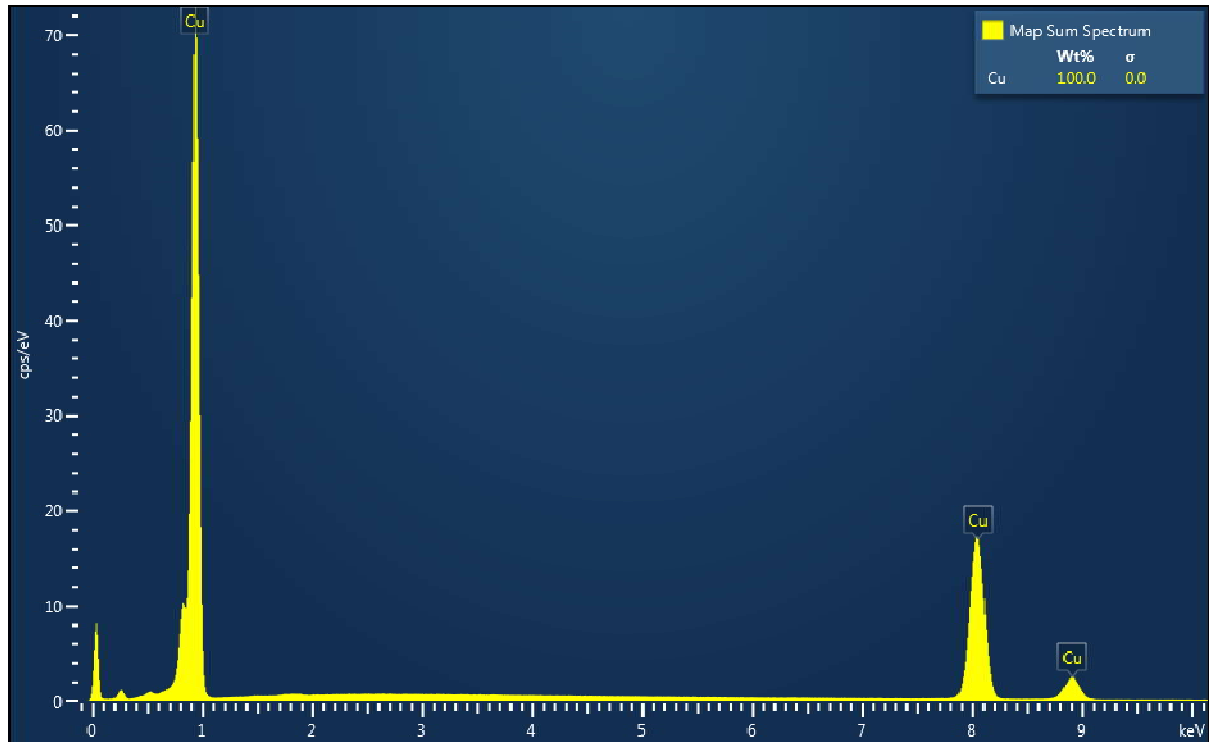
Mag: 200x; 500µm

Mag: 1500x; 50µm

Mag: 4500x; 20µm

Fonte: Autor, 2018.

Figura 37 - EDS para o cobre puro



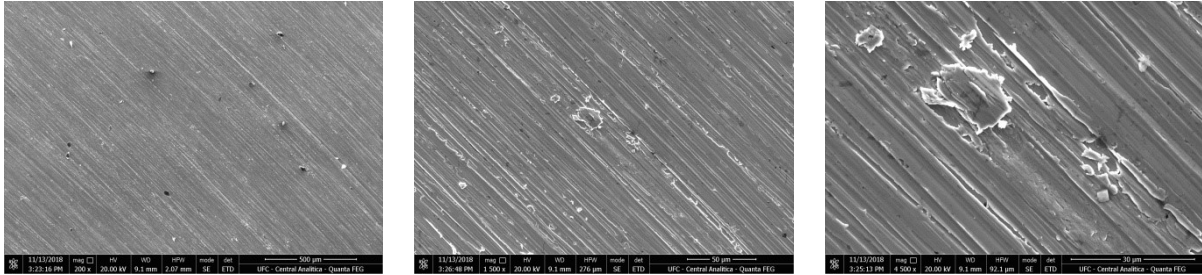
Fonte: Autor, 2018.

- Amostra de cobre imerso em 5 ppm de inibidor e 500 ppm de Cl^- :

As figuras 38 e 39 mostram os ensaios de MEV e EDS para o cobre imerso em 5 ppm de inibidor e 500 ppm Cl^- , é possível notar alguns pontos escuros na superfície, que podem ser devidos à corrosão. A EDS, no entanto, detectou apenas a presença de cobre e oxigênio na superfície metálica, o que pode sugerir a formação de óxidos como CuO ou Cu_2O . Seria interessante realizar a EDS em outras regiões da amostra, a fim de verificar se esse comportamento foi devido a um

ponto de corrosão, ou se, de fato, representa o comportamento da amostra como um todo.

Figura 38 - MEV para o cobre imerso em solução de 5 ppm de inibidor e 500 ppm de Cl^-



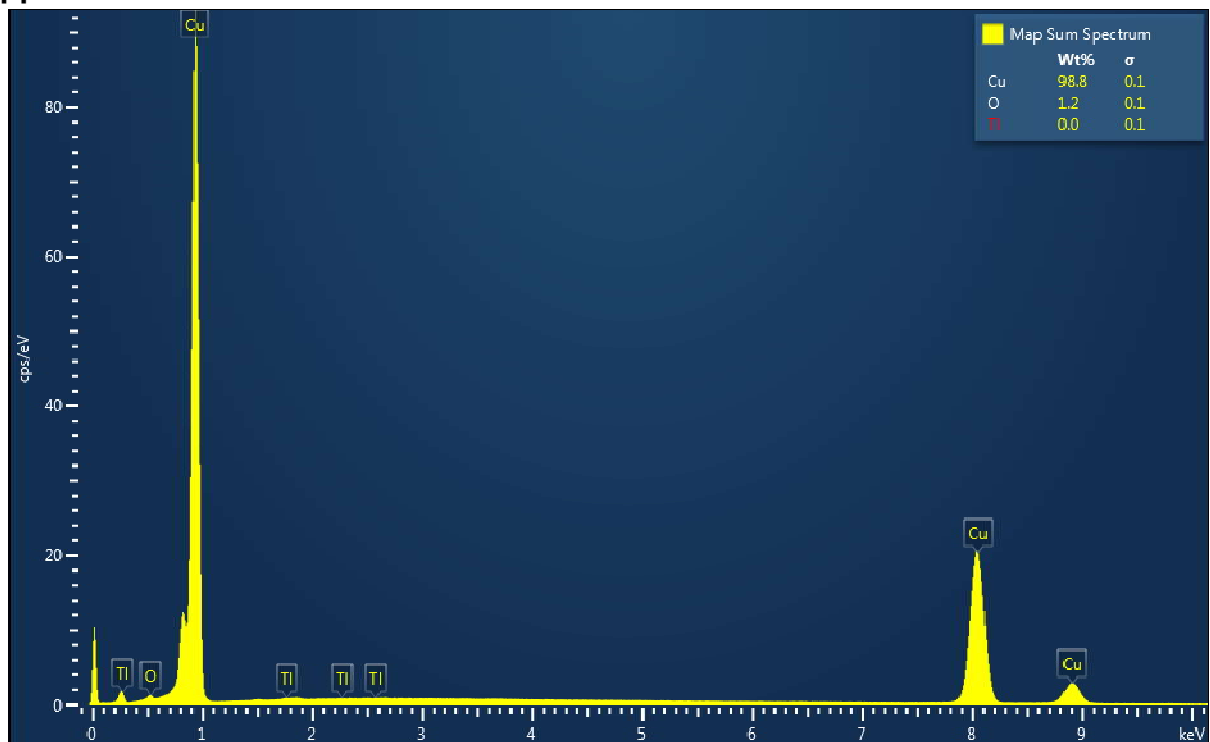
Mag: 200x; 500 μm

Mag: 1500x; 50 μm

Mag: 4500x; 20 μm

Fonte: Autor, 2018.

Figura 39 - EDS para o cobre imerso em solução de 5 ppm de inibidor e 500 ppm de Cl^-



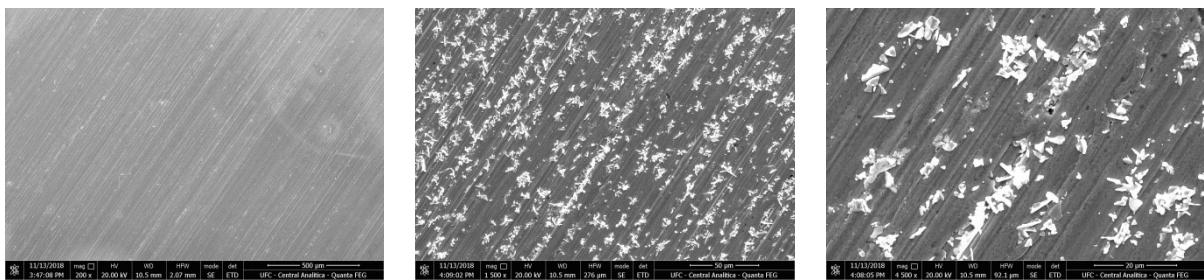
Fonte: Autor, 2018.

- Amostra de cobre imerso em meio de 500 ppm de Cl^-

As figuras 40 e 41 mostram os ensaios de MEV e EDS para o cobre imerso em 500 ppm Cl^- , é possível claramente observar sinais de corrosão na

superfície metálica, de modo que os pontos notados na figura 38 (meio com inibidor) podem ser considerados desprezíveis quando comparados ao meio sem inibidor. Além disso, a EDS detectou a presença de cobre, carbono, oxigênio e cloro na superfície metálica, o que pode sugerir a formação de óxidos como CuO ou Cu_2O e também de CuCl (reação mostrada na seção 2.2.2) (TASIĆ et al, 2018). Portanto, as microscopias confirmam os resultados obtidos nos ensaios eletroquímicos, de que o inibidor AZ 8101, de fato é eficaz em reduzir o processo corrosivo.

Figura 40 - MEV para o cobre imerso em meio de 500 ppm de Cl^-



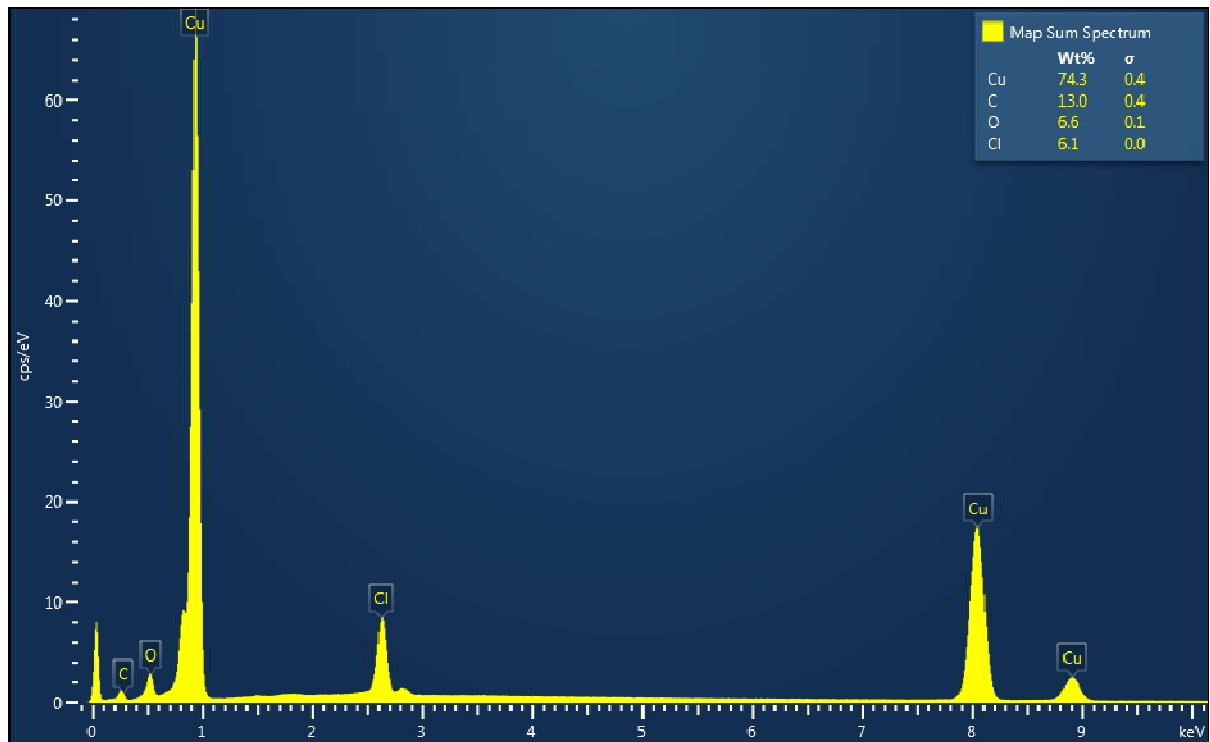
Mag: 200x; 500 μm

Mag: 1500x; 50 μm

Mag: 4500x; 20 μm

Fonte: Autor, 2018.

Figura 41 - EDS para o cobre imerso em meio de 500 ppm de Cl^-



Fonte: Autor, 2018.

5 CONCLUSÃO

- Diante dos resultados apresentados nos ensaios eletroquímicos e nas imagens de microscopia é possível afirmar que o inibidor AZ 8101[®] possui uma excelente eficiência de inibição da corrosão para todas as concentrações avaliadas, acima de 90%, mesmo em pequenas concentrações como 5 ppm, para os meios contendo 250 e 500 ppm de Cl⁻, quando expostos à temperatura ambiente e sem aeração forçada.
- Foi comprovado que o aumento da concentração de inibidor não trouxe melhoria de eficiência, sendo 5 ppm a concentração suficiente para minimizar a corrosão
- Com relação aos meios de 250 e 500 ppm de Cl⁻, foi notado que com o aumento da condutividade do meio, o desempenho do inibidor ficou mais semelhante, praticamente não houve alteração com o aumento da concentração.
- É importante frisar que em processos industriais, outros fatores como: temperatura, agitação, presença de sais e impurezas, podem intensificar o processo corrosivo e provavelmente seja necessário aumentar a concentração de inibidor, como prevê o fabricante, ao sugerir a dosagem entre 5 e 25 ppm.
- Por fim, os ensaios demonstraram que o inibidor em questão é do tipo misto e seu mecanismo de atuação é por meio da isoterma de Langmuir. Quanto aos ensaios de perda de massa, o tempo de imersão de 28 dias para 250 ppm de Cl⁻ e 14 dias para 500 ppm de Cl⁻ não foram suficientes para haver perda material, desse modo, seria interessante que os ensaios fossem realizados por um maior período de tempo.

6 Sugestões para trabalhos futuros

Seria interessante avaliar o comportamento do inibidor com outras condições que são encontradas em processos industriais como: altas temperaturas, meio sob agitação e presença de outros sais ou impurezas. Além disso, seria importante que a influência da condutividade elétrica do meio fosse avaliada mais profundamente.

REFERÊNCIAS

ABRACO. Inibidores de Corrosão: confiabilidade e redução de custos. **Corrosão e Proteção: Ciência e Tecnologia em Corrosão**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 14, p.9-13, mar. 2007. Disponível em: <<http://www.abraco.org.br/src/uploads/2016/01/Revista-corrosao-e-protecao-14.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2018.

ALVES, Fábio. **O que é Cobre e qual sua principal utilização?** 2012. Disponível em: <<https://www.industriahoje.com.br/o-que-e-cobre-e-qual-sua-principal-utilizacao>>. Acesso em: 18 set. 2018.

ANYADIKE, Nnamdi. **Copper: A Material for the New Millenium**. [S.l.]: WoodheadPublishing, 2002.

Apostila de inibidores. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/lapec/wa_files/inibidores_20_20apost.pdf>. Acesso em: 13 out. 2018.

COSTA, Stefane Nunes. **COMPOSTOS DERIVADOS DO IMIDAZOL COMO INIBIDORES DA CORROSÃO DO AÇO CARBONO EM MEIO ÁCIDO**. 2017. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

DANTAS, Evandro. **Geração de vapor e água de refrigeração**. Rio de Janeiro: Ecolab/José Olympio, 1988.

FATEH, A.; ALIOFKHAZRAEI, M.; REZVANIAN, A.r.. Review of corrosive environments for copper and its corrosion inhibitors. **Arabian Journal Of Chemistry**, [s.l.], p.2-8, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.021>.

FINŁGAR, Matjažet al. The corrosion inhibition of certain azoles on steel in chloride media: Electrochemistry and surface analysis. **Corrosion Science**, [s.l.], v. 111, p.370-381, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.028>.

FOO, K.y.; HAMEED, B.h.. Insights in to the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 156, n. 1, p.2-10, 1 jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2007.

JAMBO, Hermano Cezar Medaber; FÓFANO, Sócrates. **Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008

MATERIAL DIDÁTICO. 2009. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14472/14472_2.PDF>. Acesso em: 01 out. 2018.

MORETTI, G.; GUIDI, F.. Tryptophan as copper corrosion inhibitor in 0.5 M aerated sulfuric acid. **Corrosion Science**, [s.l.], v. 44, n. 9, p.1995-2011, set. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0010-938x\(02\)00020-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0010-938x(02)00020-3).

MURALISANKAR, M. et al. N(1)-pentylisatin-N(4)-methyl-N(4)-phenyl thiosemicarbazone (PITSc) as a corrosion inhibitor on mild steel in HCl. *Journal of Alloys and Compounds*, v.695, p. 171–182, 2017

O COBRE e suas aplicações. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/o-cobre-e-suas-aplicacoes>>. Acesso em: 01 out. 2018.

PANOSSIAN, Zehbour. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993.

RAMESH, S.; RAJESWARI, S..Evaluation of inhibitors and biocide on the corrosion control of copper in neutral aqueous environment. **Corrosion Science**, [s.l.], v. 47, n. 1, p.151-169, jan. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.013>.


Saiba quais são as principais aplicações do cobre. Disponível em: <<http://dubronze.com.br/saiba-quais-saacoes-do-cobre/>>. Acesso em: 05 set. 2018.

TASIĆ, Žaklina Z. et al. Cephadrine as corrosion inhibitor for copper in 0.9% NaCl solution. **Journal Of Molecular Structure**, [s.l.], v. 1159, p.46-54, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.01.031>

TROVATI, Joubert. **TRATAMENTO DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO**. Disponível em: <http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.

WOLYNEC, Stephan. **TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS EM CORROSÃO**. São Paulo: Edusp, 2002.

ANEXO A - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS (FISPQ) AZ 8101

	GE Power & Water Water & Process Technologies	Versão: 1.0 Data de vigência: 13/04/2015 Previous Date: 18/07/2014									
	Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ) INHIBITOR AZ8101										
Outros perigos que não resultam em uma classificação	Nenhum conhecido.										
Informações suplementares	O produto é corrosivo ao Alumínio.										
Outras informações	A Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos deste produto químico perigoso pode ser obtida por meio de telefone, e-mail ou no site da empresa.										
3. Composição e informações sobre os ingredientes											
Misturas											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nome químico</th> <th>No. CAS</th> <th>Concentração (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4(ou 5)-metil-1H-benzotriazolida de sodio</td> <td>64665-57-2</td> <td>10 - 20</td> </tr> <tr> <td>Hidróxido de sódio</td> <td>1310-73-2</td> <td>1 - 2,5</td> </tr> </tbody> </table>	Nome químico	No. CAS	Concentração (%)	4(ou 5)-metil-1H-benzotriazolida de sodio	64665-57-2	10 - 20	Hidróxido de sódio	1310-73-2	1 - 2,5		
Nome químico	No. CAS	Concentração (%)									
4(ou 5)-metil-1H-benzotriazolida de sodio	64665-57-2	10 - 20									
Hidróxido de sódio	1310-73-2	1 - 2,5									
* Designa que uma identidade química específica e/ou a percentagem da sua composição ter sido retidos como segredo comercial.											
Comentários de composição	Os ingredientes listados referem-se aos ingredientes perigosos que atendem aos limites de corte estabelecidos pela norma ABNT NBR 14725.										