



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LUCAS HENRIQUE GOMES DE MEDEIROS

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE UMA SEMICÉLULA DE PROTEÇÃO CATÓDICA
GALVÂNICA**

MOSSORÓ

2019

LUCAS HENRIQUE GOMES DE MEDEIROS

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE UMA SEMICÉLULA DE PROTEÇÃO CATÓDICA
GALVÂNICA**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Ferreira da Silva Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Gecílio Pereira da Silva

MOSSORÓ

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

G488e Gomes de Medeiros, Lucas Henrique.

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE UMA SEMICÉLULA DE PROTEÇÃO CATÓDICA GALVÂNICA / Lucas Henrique Gomes de Medeiros. - 2019.

32 f: il.

Orientador: Luiz Ferreira da Silva Filho.

Co-orientador: Gecilio Pereira da Silva.

Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Química, 2019.

1. Corrosão. 2. Semicélula. 3. Proteção catódica. 4. Taxa de corrosão. 5. Perda de massa.

I. Silva Filho, Luiz Ferreira, orient. II. Pereira da Silva, Gecilio, co-orient. III. Título.

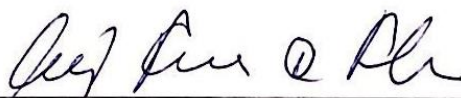
LUCAS HENRIQUE GOMES DE MEDEIROS

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE UMA SEMICÉLULA DE PROTEÇÃO CATÓDICA
GALVÂNICA**

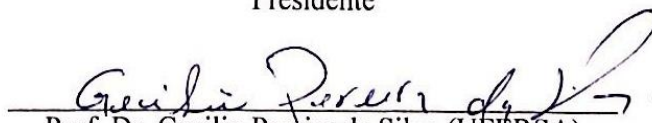
Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Defendida em: 09 / 08 / 2019.

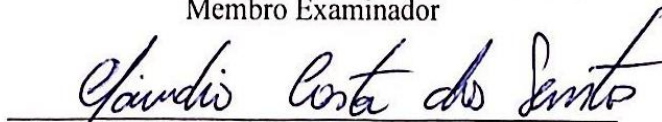
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Luiz Ferreira da Silva Filho (UFERSA)
Presidente



Prof. Dr. Gecilio Pereira da Silva (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Dr. Claudio Costa dos Santos (UFERSA)
Membro Examinador

RESUMO

A corrosão é um fator recorrente na indústria, afetando indiscriminadamente todos os setores de produção e processos industriais. Estudos relatam que o gasto de recursos derivado desse problema gira em torno de 2,5 trilhões de dólares, equivalente a quase 3,4% do PIB mundial. Desta forma, este trabalho busca uma forma de reduzir o impacto causado por esse fenômeno, onde analisou-se o comportamento do aço 1020 frente a um meio corrosivo, a partir disso, verificar, com base na perda de massa do metal, a taxa de corrosão para o qual a amostra foi exposta. Neste estudo comparou-se duas barras do mesmo aço, onde em uma delas implementou-se um semicélula de proteção, composta pelo enchimento condutor e uma barra de Zinco. Com as barras situadas em recipientes distintos, porém com a mesma solução corrosiva de Cloreto de Sódio 3% (NaCl), observou-se durante sete semanas e meia, a partir da pesagem das mesmas, a variação na massa do aço. Ao fim do experimento constatou-se que a semicélula atingiu o seu propósito, onde a amostra de aço que não apresentava a proteção atingiu uma taxa de corrosão equivalente a $0,89 \text{ mm.ano}^{-1}$ (milímetros por ano), já a barra de aço protegida alcançou a marca de $0,41 \text{ mm.ano}^{-1}$. Além da verificação a partir da taxa de corrosão, verificou-se o aspecto visual das amostras, como também a porcentagem de metal na amostra, evidenciando novamente a eficiência do estudo proposto.

Palavras-chave: Corrosão. Semicélula. Proteção catódica. Taxa de corrosão. Perda de massa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de um processo de corrosão.....	12
Figura 2: Esquema representativo de processo corrosivo de caráter eletroquímico.....	13
Figura 3: Curva de Polarização na presença de um inibidor catódico.....	14
Figura 4: Esquema de proteção anódica.	15
Figura 5: Seção de uma estrutura de concreto armado recuperada com a utilização de pastilha galvânica.....	16
Figura 6: Proteção catódica por anodo de sacrifício.....	17
Figura 7: Sistema de proteção.	22
Figura 8: A) Metal sem proteção, semanas iniciais. B) Metal sem proteção, final do experimento.	23
Figura 9: A) Metal com proteção, semanas iniciais. B) Metal com proteção, final do experimento.	24
Figura 10: Comparativo do ataque corrosivo.	25
Figura 11: Perda de massa com o tempo.	27
Figura 12: Porcentagem de metal nas amostras.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Série eletroquímica.....	18
Tabela 2 - Valores para a constante de corrosão K.	19
Tabela 3 - Enchimento condutor	21
Tabela 4 - Análise da taxa de corrosão	26
Tabela 5 - Taxa de corrosão em milímetros por ano	26
Tabela 6 - Perda de massa com o tempo	27

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

mm.ano ⁻¹	Milímetros por ano
PIB	Produto Interno Bruto
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1. CORROSÃO	12
2.2. PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO.....	13
2.3. POTENCIAIS DE REDUÇÃO	17
2.4. TAXA DE CORROSÃO	19
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 PREPARO DO MEIO CORROSIVO	20
3.2 PREPARO DA SOLUÇÃO DE LIMPEZA.....	20
3.3 PREPARO DOS ELETRODOS	20
3.4 PREPARO DA SEMICÉLULA	21
3.5 MONTAGEM DO SISTEMA DE PROTEÇÃO	21
3.6 ACOMPANHAMENTO DA PERDA DE MASSA	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1. ASPECTO VISUAL DAS AMOSTRAS.....	23
4.2. TAXA DE CORROSÃO	25
4.3. ESTUDO DA PERDA DE MASSA DAS AMOSTRAS.....	26
5. CONCLUSÃO	29
6. REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico proporciona diversas melhorias para vários campos do cotidiano industrial, além de favorecer o crescimento industrial, também mostra uma visão mais ampla, em muitos casos otimizada, sobre a realização de determinado processo. Porém, além de possibilitar formas diversas de enfrentar uma situação, esse desenvolvimento viabiliza novas formas de diminuir o impacto causado por certos problemas na indústria. Com isso, um dos problemas mais recorrentes industrialmente é o impacto causado por perdas de material devido ação corrosiva. Estudos apontam que o impacto causado pela corrosão gira em torno de 2,5 trilhões de dólares, equivalente a quase 3,4 % do PIB mundial (KOCH, 2017).

No cotidiano, a primeira visão sobre corrosão é a associação com a ferrugem. Apesar da estreita relação com os metais, esse fenômeno ocorre em outros materiais, como concreto, polímeros orgânicos, entre outros. Sem que se perceba, processos corrosivos estão presentes direta ou indiretamente no dia a dia, pois podem ocorrer em grades, automóveis, eletrodomésticos e instalações industriais (MERÇON; GUIMARÃES; MAINIER, 2004). Há diversas formas para definir-se a corrosão, segundo Gentil (2007), é caracterizada como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços físicos. O processo corrosivo é, de maneira geral, espontâneo, e atua na interação entre o material e o meio, provocando alterações físico-químicas na estrutura do material, inviabilizando, em casos mais severos, o seu uso (GENTIL, 2011).

Dessa forma, a busca por sistemas de proteção para reduzir a ação desse fenômeno torna-se uma ferramenta importante para as indústrias. Atualmente, diversas técnicas anticorrosivas têm sido utilizadas, como os revestimentos, a proteção catódica e anódica e o uso de inibidores de corrosão. A maioria das técnicas promove o isolamento do metal de agentes corrosivos, diminuindo assim a possibilidade de haver corrosão (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014).

Um dos principais métodos para o combate da corrosão é a proteção catódica, esse processo consiste na remoção artificial do aparecimento de zonas que se comportem anodicamente, provocando o comportamento catódico da estrutura. Como consequência, o fluxo elétrico que existiria entre as zonas é interrompido, evitando a corrosão (GENTIL 2011).

Com base nisto, este trabalho busca a aplicação do método de proteção catódica a partir de um novo ponto de vista, onde serão utilizados conhecimentos acerca da proteção catódica por anodo de sacrifício para implementação de uma semicélula de Zinco, onde será acoplada à amostra de aço 1020 e submetida a ação do meio corrosivo.

A caracterização da eficiência da semicélula será verificada com base na porcentagem de metal ao fim do experimento, como também pela taxa de corrosão apresentada durante o período de estudo.

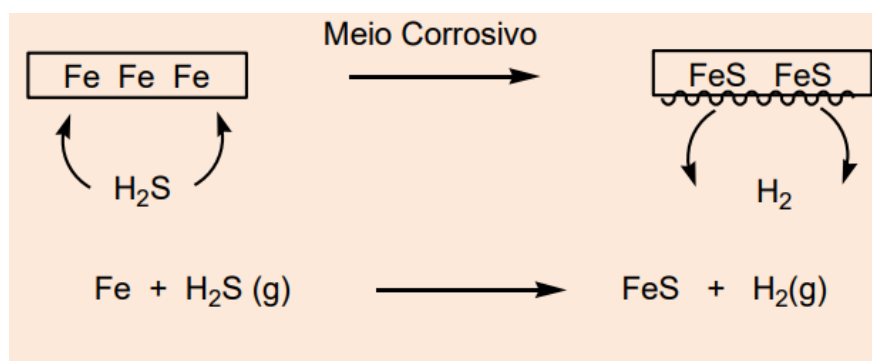
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Corrosão

A corrosão pode ser explicada como a deterioração do material que se inicia em sua superfície por ação química ou eletroquímica de um meio oxidante, agravada geralmente por esforços mecânicos (VAZ; ACCIARI; CODARO, 2011).

A corrosão química, ou seca, ocorre mediante um agente químico atacar diretamente o material. Desta maneira, não se tem a transferência de cargas ou elétrons, não havendo a formação de uma corrente elétrica. Este processo consiste na reação química entre o meio corrosivo e o material exposto a ele, resultando na formação de um produto de corrosão sobre a superfície do material. Esse mecanismo de corrosão, normalmente, ocorre em altas temperaturas, como em fornos, caldeiras e unidades de processo (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014). A Figura 1 mostra como uma placa de ferro interage com sulfeto de hidrogênio na ausência de umidade.

Figura 1: Exemplo de um processo de corrosão



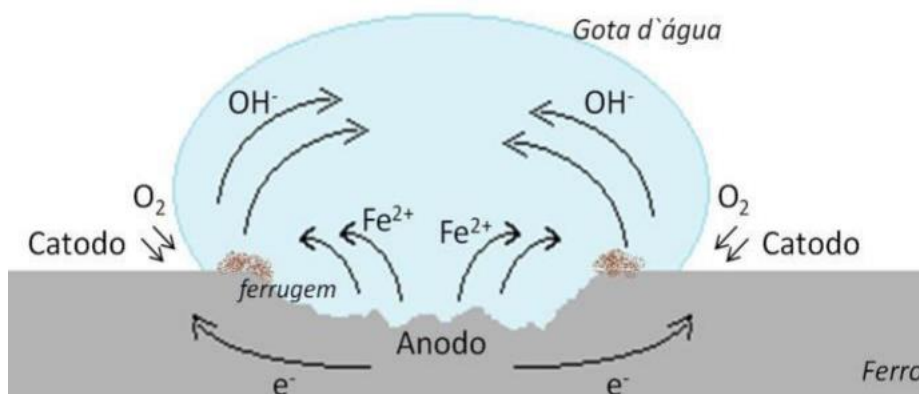
Fonte: FRAUCHES-SANTOS *et al.* (2014)

Observa-se à adsorção do gás na superfície do ferro, provocando o ataque corrosivo, e formando uma película de Sulfeto Ferroso (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014). Esta película é quase impermeável sobre a superfície metálica podendo inibir ou impedir a continuação do processo corrosivo, a qual é denominada de passivação (MAINIER, 2006).

A corrosão eletroquímica consiste em um processo espontâneo, podendo ocorrer quando o metal ou liga está em contato com um eletrólito, onde ocorrem, simultaneamente, as reações anódicas (oxidação) e catódicas (redução), provocando a deterioração do material (MAINIER; SANDRES; TAVARES, 2007). A transferência dos elétrons da região anódica

para a catódica é feita por meio de um condutor metálico, e a difusão de ânions e cátions na solução fecha o circuito elétrico. A intensidade do processo de corrosão é avaliada pelo número de cargas de íons que se descarregam no catodo ou, então, pelo número de elétrons que migram do anodo para o catodo (MAINIER, 2006). Esse processo pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2: Esquema representativo de processo corrosivo de caráter eletroquímico.



FONTE: FELIPE *et al.*, 2013

Observa-se que os íons de ferro migram para a região catódica, enquanto os íons OH^- direcionam-se para a região anódica. Uma reação intermediária ocorre, provocando a formação de hidróxido ferroso, representado como ferrugem.

Ao entender o princípio básico do processo de corrosão, torna-se possível avaliar uma maneira que evitar, ou eliminar, os efeitos que podem ser provocados.

2.2. Proteção contra corrosão

Atualmente, diversas técnicas anticorrosivas têm sido utilizadas, como os revestimentos, a proteção catódica e anódica e o uso de inibidores de corrosão. A maioria das técnicas promove o isolamento do metal de agentes corrosivos, diminuindo assim a possibilidade de ocorrer corrosão (FRAUCHES-SANTOS *et al.*, 2014).

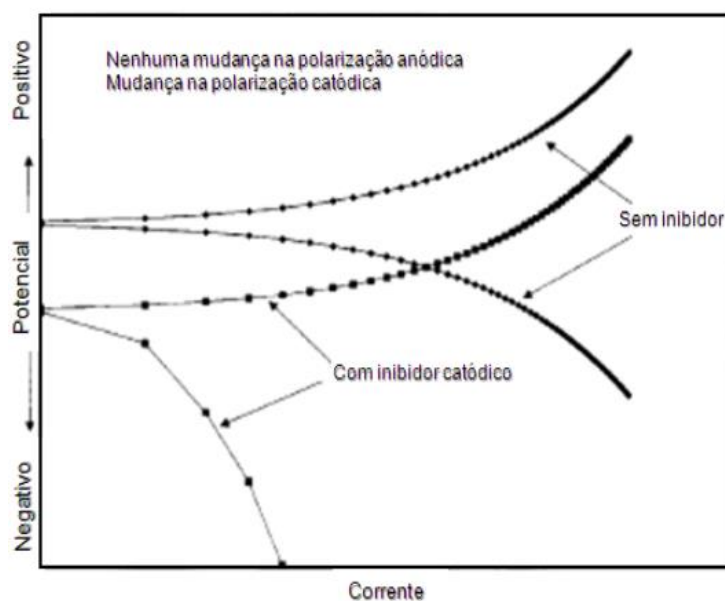
O método de proteção por revestimento baseia-se na formação do filme de passivação, onde um revestimento metálico é utilizado para formar uma barreira entre o meio corrosivo e o material a ser protegido. Desta forma, enquanto o revestimento externo não sofrer danificações, o material estará protegido das ações do meio por impedimento estérico. Quando ocorrer danos ao revestimento, e considerando que ele tem um potencial de redução

menor do que o material a ser protegida, a proteção será feita a partir dos princípios eletroquímicos do sistema, onde o revestimento cederá elétrons, evitando a perda de material por parte do material protegido.

Já os inibidores de corrosão são substâncias que adicionadas ao meio corrosivo que objetivam evitar, prevenir ou impedir o desenvolvimento das reações de corrosão. A eficiência de proteção oferecida pelos inibidores depende dos metais e ligas bem como da severidade do meio (MAINIER, 2006). Entre a classificação de inibidores destacam-se duas: inibidores anódicos e inibidores catódicos.

Os inibidores catódicos atuam atenuando as reações catódicas. São substâncias que fornecem íons metálicos capazes de reagir com a hidroxila existente no meio, produzindo compostos insolúveis. Estes compostos insolúveis envolvem a área catódica, impedindo a difusão do oxigênio e a condução de elétrons na forma de íons (GENTIL, 2003). Este efeito provoca a polarização catódica da estrutura, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Curva de Polarização na presença de um inibidor catódico.



FONTE: KINA, 2011.

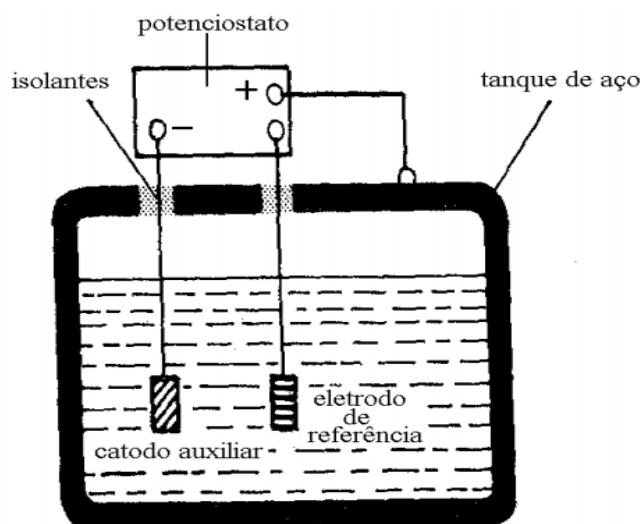
Os inibidores anódicos atuam retardando ou impedindo as reações anódicas. Funcionam geralmente reagindo com o produto de corrosão inicialmente formado, ocasionando um filme aderente e insolúvel, na superfície do metal, ocorrendo à polarização anódica (GENTIL 2003). Ao contrário do inibidor catódico, a formação do filme na superfície do metal, induzido pelo inibidor anódico, deve ser completa, pois em regiões de falhas, neste caso, continuará a ocorrer à dissolução do metal levando à corrosão localizada. Por este

motivo a concentração é tão importante no caso deste inibidor, devendo-se trabalhar acima da concentração crítica (KINA, 2011).

Os inibidores anódicos podem ser classificados como oxidantes e não-oxidantes. Os mais conhecidos inibidores oxidantes são os cromatos e os nitritos. Entretanto, apesar de muito eficientes, os cromatos foram substituídos por substâncias menos agressivas ao meio ambiente. Entre os não-oxidantes estão os molibdatos, que não são poluentes (KINA, 2011).

Já a proteção anódica é um método usado para controlar ou limitar a taxa de corrosão metálica. Baseia-se na aplicação externa de uma corrente anódica, em um potencial controlado, para formar um filme protetor em uma superfície de metal (WALKER; WARD, 1969). Esse filme é formado por óxidos do próprio metal, e esta camada de óxido age como uma barreira protetora capaz de isolar a superfície do substrato do eletrólito (SILVA et al., 2015). A Figura 4 relata o esquema teórico do sistema de proteção anódica.

Figura 4: Esquema de proteção anódica.

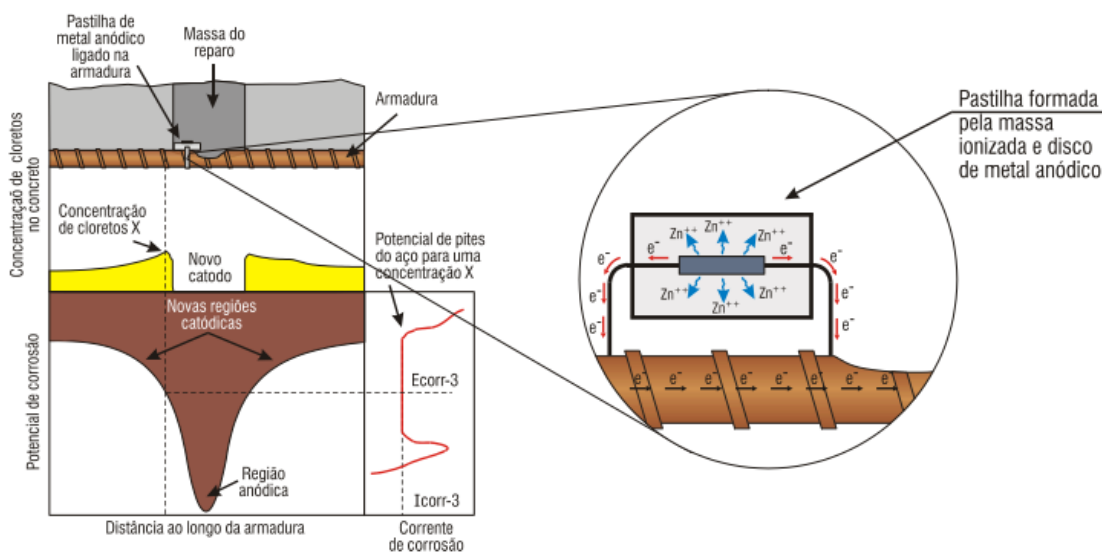


FONTE: GENTIL, 2011.

O processo proteção catódica é a técnica que transforma a estrutura metálica em uma pilha artificial, evitando, assim, que a estrutura se deteriore. É graças à proteção catódica que tubulações enterradas para o transporte de água, petróleo e gás, e grandes estruturas portuárias e plataformas marítimas operam com segurança. A proteção catódica de estruturas metálicas é baseada na injeção de corrente elétrica por meio de duas técnicas: a proteção por corrente impressa (não espontânea) e proteção por anodos galvânicos (espontânea) (MERÇON, GUIMARÃES, MAINIER, 2004).

O mecanismo utilizado para essa proteção considera que o processo corrosivo em uma estrutura metálica enterrada ou submersa é caracterizado pelo aparecimento de zonas anódicas e catódicas na estrutura. Dessa forma, o meio em que o material está comporta-se como o eletrólito, e a própria estrutura comporta-se como meio condutor, provocando a transferência de corrente elétrica entre os pontos (GENTIL,1996). A Figura 5 exemplifica um processo de proteção catódica.

Figura 5: Seção de uma estrutura de concreto armado recuperada com a utilização de pastilha galvânica.



FONTE: RODRIGUES, 2005.

É apresentado na Figura 5 que as correntes galvânicas de proteção, uma vez atuando em toda a área especificada, impedirão o funcionamento de regiões anódicas e, portanto, parando a corrosão (RODRIGUES, 2005).

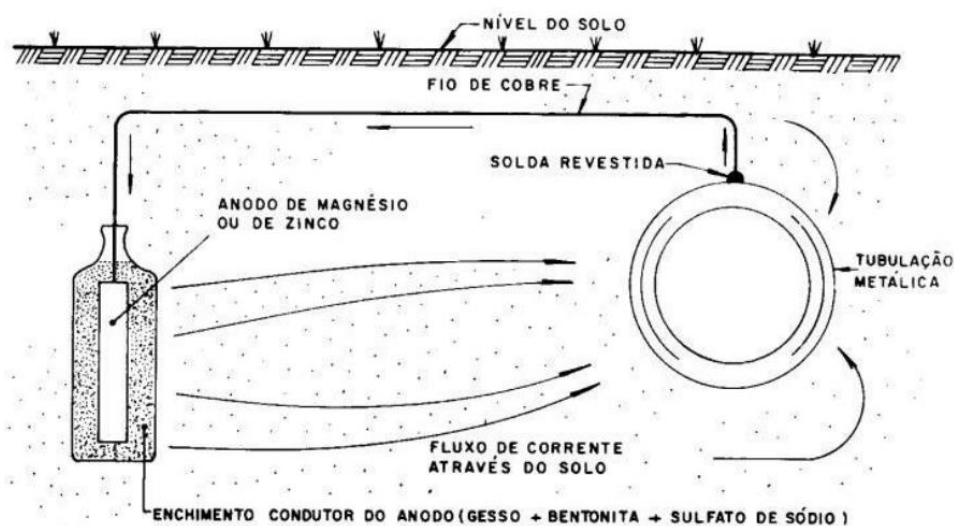
Basicamente, a proteção catódica consiste no processo de remoção artificial do aparecimento de zonas que se comportem anodicamente, provocando o comportamento catódico da estrutura. Como consequência, o fluxo elétrico que existiria entre as zonas é interrompido, evitando completamente a corrosão (GENTIL, 2011).

Na proteção por corrente impressa o fluxo de corrente origina-se da força eletromotriz de uma fonte geradora de corrente elétrica contínua, buscando a polarização da superfície protegida. Para a dispersão dessa corrente elétrica no eletrólito são utilizados anodos inertes, com características a depender do eletrólito. A grande vantagem desse método é que, por

utilizar uma fonte externa, a potência e tensão de saída podem assumir o valor que se necessite, em função da resistividade elétrica do meio (GENTIL, 1996).

Na proteção por anodo de sacrifício, ou proteção catódica galvânica, o fluxo de corrente elétrica é originado da diferença de potenciais de redução entre o metal a ser protegido, e outro escolhido como anodo, com a função de proteger. A estrutura a ser protegida é ligada a um metal mais ativo, como o Zinco, imerso no eletrólito. O resultado é uma pilha galvânica na qual o metal ativo trabalha como anodo, promovendo um fluxo de elétrons para a estrutura, que se torna catódica. Neste caso, o anodo é destruído progressivamente, promovendo a proteção da estrutura (RODRIGUES, 2005). A Figura 6 representa um sistema de proteção utilizando anodos de sacrifício.

Figura 6: Proteção catódica por anodo de sacrifício.



FONTE: IEC, 1990.

Observa-se que a corrente emitida pelo anodo penetra na tubulação através do solo ou da água, bloqueia as correntes de corrosão e retorna ao seu ponto inicial, fechando o circuito por intermédio do fio de cobre e protegendo a estrutura (IEC, 1990).

2.3. POTENCIAIS DE REDUÇÃO

O potencial de redução de uma espécie é tido como sua tendência a ganhar elétrons e se reduzir. Valores positivos maiores de potencial de redução são indicativos de uma maior tendência a se reduzir (BHATT, 2016).

A forma mais usual de corrosão galvânica envolve o contato físico ou uma ligação elétrica de dois metais diferentes imersos num eletrólito. A diferença de potencial entre estes metais produzirá uma corrente elétrica entre eles. O metal menos nobre sofrerá um aumento da sua velocidade de corrosão em relação à que teria se não estivesse ligado (GONÇALVES, 2013). O comportamento de alguns componentes é listado na literatura na forma de série eletroquímica. A série é um arranjo ordenado dos potenciais padrão para todos os metais. Os valores mais negativos correspondem aos metais mais reativos. A posição na série é determinada pelo potencial de equilíbrio de um metal em contato com seus íons em uma concentração igual à atividade da unidade (REVIE; UHLIG, 2008). A Tabela 1 apresenta uma parte da série eletroquímica.

Tabela 1 - Série eletroquímica.

Reação no eletrodo	Potencial padrão , ϕ°, Em Volts a 25 °C
$\text{In}^{3+} + 3e^- = \text{In}$	-0.342
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.403
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.440
$\text{Ga}^{3+} + 3e^- = \text{Ga}$	-0.53
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0.74
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.763
$\text{Cr}^{2+} + 2e^- = \text{Cr}$	-0.91

FONTE: Adaptado de REVIE; UHLI (2008).

A Tabela acima apresenta somente alguns dos elementos presentes na literatura, observa-se que uma estrutura de aço, liga de Ferro e Carbono, pode ser protegida a partir do uso do zinco, isso ocorre porquê o Zinco é mais eletronegativo que o aço na série eletroquímica. Logo, em uma estrutura utilizando Zinco como revestimento protetor, caso ocorra uma danificação na estrutura, expondo o aço, a corrosão ocorrerá preferencialmente no Zinco, dessa forma protegendo o aço.

2.4. TAXA DE CORROSÃO

A taxa de corrosão pode ser representada pela massa desgastada de certo material por unidade de área na unidade de tempo (ARAÚJO, 2005). A partir dessa taxa podemos determinar a velocidade com que o processo de corrosão ocorre.

Para quantificar esse processo, a American Society for Testing and Materials (ASTM) apresenta a seguinte equação (ASTM, 1999).

$$\text{Taxa de corrosão} = (K \cdot W) / (A \cdot T \cdot D) \quad (1)$$

Onde o A representa a área exposta à corrosão em cm^2 , D a densidade do material em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, K é a constante utilizada para determinar a unidade da taxa de corrosão, T representa o tempo, em horas, de exposição do metal ao meio corrosivo, e W a perda de massa que o metal sofreu durante o período de exposição. A Tabela 2 apresenta dados da constante de corrosão, K, em diferentes unidades de medida.

Tabela 2: Valores para a constante de corrosão K.

Unidades da taxa de corrosão	Valor da constante K
Milhas por ano (mpa)	3,45E+06
Polegada por ano (ppa)	3,45E+03
Polegada por mês (ppm)	2,87E+02
Milímetros por ano ($\text{mm} \cdot \text{ano}^{-1}$)	8,76E+04
Micrometros por ano ($\text{um} \cdot \text{ano}^{-1}$)	8,76E+07
Picrometros por segundo ($\text{pm} \cdot \text{s}^{-1}$)	2,78E+06
Gramas por metro quadrado por hora ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	(1,40E+04)*D
Miligramas por decímetro quadrado por dia (mdd)	(2,40E+06)*D
microgramas por metro quadrado por hora ($\text{ug} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	(2,78E+06)*D

FONTE: Adaptado de ASTM, 1999.

A partir dos dados, define-se a unidade que pretende-se trabalhar com a taxa de corrosão, observando que a taxa de corrosão em unidades de milímetros por ano ($\text{mm} \cdot \text{ano}^{-1}$) é comumente observada na literatura, e será adotada neste estudo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente preparou-se os eletrodos a serem utilizados, como também a montagem da semicélula de proteção catódica, onde posteriormente acoplou-se na amostra a ser protegida. Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Química aplicada a engenharia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

3.1 PREPARO DO MEIO CORROSIVO

O meio corrosivo proposto nesta pesquisa foi à utilização do cloreto de sódio 3% (NaCl 3%). A solução foi preparada com base em Morita e Assumpção (2003). Onde se utilizou 6 g do Cloreto de Sódio para a preparação de 200 mL do meio corrosivo.

3.2 PREPARO DA SOLUÇÃO DE LIMPEZA

As amostras expostas ao meio corrosivo tiveram os produtos de corrosão retirados com o auxílio da solução Clark, a composição foi baseada no ASTM G1 (1999), que informa a relação entre os reagentes. Para essa solução utilizou-se 100 mL de Ácido Clorídrico PA (HCl), e adicionou-se 4 g de Trióxido de Antimônio (Sb_2O_3), como também 10 g de Cloreto de estanho (SnCl_2).

Nesta solução, o Trióxido de Antimônio tem o papel de inibir o ataque corrosivo, enquanto o Cloreto de Estanho é utilizado para reduzir o Cloreto de Ferro (III) (FeCl_3) produzido na reação para Cloreto de Ferro (II) (FeCl_2).

3.3 PREPARO DOS ELETRODOS

Utilizou-se duas barras de aço SAE 1020 para o estudo, onde, antes de serem expostos ao meio corrosivo, passaram por um processo de limpeza, inicialmente um banho ácido, para remoção de possíveis resíduos industriais, e após isso, foram imersos em solução desengraxante fortemente alcalino, com objetivo de minimizar os efeitos do ácido na superfície do metal.

3.4 PREPARO DA SEMICÉLULA

A semicélula de proteção foi preparada utilizando uma barra de Zinco para atuar como metal de sacrifício e realizar a proteção do aço. Essa barra foi inserida em um suporte plástico contendo o enchimento condutor, composto por uma mistura de água destilada, Sulfato de Cálcio (CaSO_4), betonita ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$), Sulfato de Sódio (NaSO_4), com o objetivo melhorar a eficiência do sistema, provocando um desgaste uniforme no Zinco, como também absorver umidade do ambiente e impedir a formação de películas isolantes.

Para esse estudo analisou-se algumas proporções dos materiais que compõem o enchimento condutor, visando a melhor uniformidade da mistura, objetivando a formação de mais densa do material, como também definir a proporção que permitiria um estado de umidade adequado ao experimento. Neste trabalho preparou-se 200 g do enchimento condutor, a Tabela 3 apresenta a composição utilizada neste experimento.

Tabela 3 - Enchimento condutor	
Material	Proporção (%)
Gipsita	60
Betonita	20
Sulfato de sódio	5
Água destilada	15

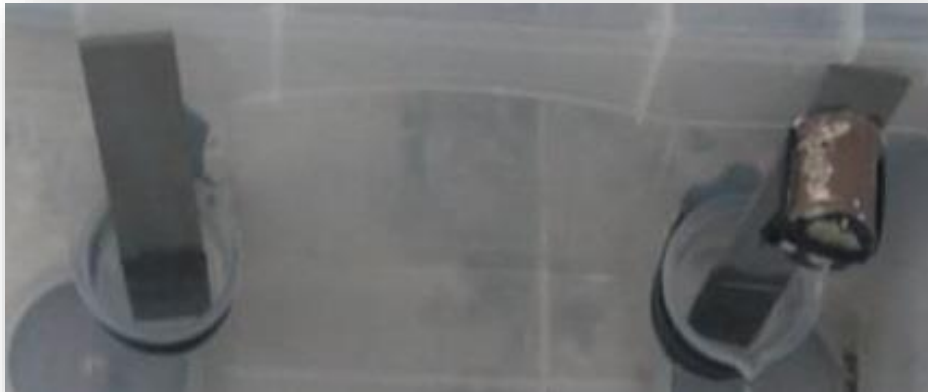
FONTE: Primária.

Após a preparação da semicélula, identificou-se a barra de aço que levou o sistema de proteção como M3, e a barra comparativa identificada como M7.

3.5 MONTAGEM DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

A semicélulas foi acoplada na barra de aço e fixada com uma braçadeira plástica e a outra barra foi utilizada como parâmetro de comparação, submetida às mesmas condições, onde não se acoplou a semicélula. Os ensaios foram iniciados com a imersão parcial dos eletrodos na solução de cloreto de sódio 3%. A Figura 7 mostra as duas amostras imersas no meio corrosivo.

Figura 7: Sistema de proteção.



FONTE: Primária.

Com o sistema montado, a etapa seguinte foi analisar o comportamento do metal frente ao ataque corrosivo do meio.

3.6. ACOMPANHAMENTO DA PERDA DE MASSA

As variações de massa nos eletrodos foram determinadas por pesagem em intervalos de sete dias, durante o período de sete semanas e meia. Esse procedimento consistiu na remoção dos eletrodos das soluções, para a remoção dos produtos de corrosão, lavagem com água destilada e secagem da amostra, e posterior pesagem do metal.

Com os dados acerca da perda de massa do metal, utilizou-se a Equação 1, com a constante de corrosão no valor de $8,76 \cdot 10^4$, para determinação da taxa de corrosão em unidade de milímetros por ano (mm.ano^{-1}).

Outro fator observado foi à porcentagem de massa em relação ao metal inicial, onde comparou-se a massa do metal a cada semana com a massa apresentada no início do experimento, antes do processo corrosivo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa serão abordados os resultados obtidos com a metodologia proposta e os mesmos serão discutidos de acordo com a teoria acerca do sistema de proteção catódica por anodos de sacrifício.

4.1. ASPECTO VISUAL DAS AMOSTRAS

Um ponto-chave para o monitoramento e controle dos sistemas que sofrem corrosão é o aspecto visual apresentado pelo mesmo, com ele é possível determinar qual o tipo de processo corrosivo está ocorrendo, e propor a melhor forma de contorná-lo. Desta forma, observou-se como o meio afetou o metal trabalhado, a Figura 8 apresenta a influência da corrosão no metal sem proteção.

Figura 8: A) Metal sem proteção, semanas iniciais. B) Metal sem proteção, final do experimento.

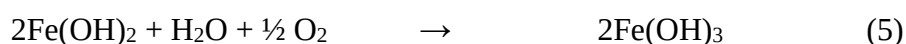


FONTE: Primária.

Na Figura 8.A) Nota-se os primeiros sinais da influência da corrosão, onde o sistema sem proteção apresentou a etapa inicial da formação dos produtos de corrosão, como o sistema é exposto à atmosfera, a interação do oxigênio com o metal foi evidenciada. Já a

Figura 9.B) mostra o metal no final da última semana de experimentos, onde, segundo Gentil (2007), admite-se como corrosão uniforme, já que observa-se um ataque em toda a extensão do metal, causando perda uniforme de espessura do material.

Outro fator a ser observado são as semi-reações do processo, as Equações 2, 3, 4 e 5 mostram de forma teórica a estrutura da reação.



As Equações 2 e 3 representam o comportamento das semi-reações anódicas e catódicas, respectivamente. Já a Equação 4 apresenta a reação em uma região intermediária, onde os íons encontram-se para formar o Hidróxido Ferroso (Fe(OH)_2). Por ser instável em soluções oxigenadas ocorre a reação mostrada na Equação 5, onde forma-se o Hidróxido Férreo (Fe(OH)_3). Quando ocorre a perda de água desse componente, tem-se a formação do Óxido de Ferro (III) mono-hidratado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), que apresenta coloração castanho-avermelhado, e retratamos como ferrugem.

A Figura 9 apresenta o metal que levou a semicélula de proteção, evidenciando um aspecto menos contaminado por parte dos produtos formados com a corrosão.

Figura 9: A) Metal com proteção, semanas iniciais. B) Metal com proteção, final do experimento.



FONTE: Primária.

Na Figura 9.A) é possível observar alguns pontos isolados de corrosão, contudo, não prejudica a eficiência da semicélula. Isso é observado na Figura 9.B), onde, apesar de sofrer ataque corrosivo, o efeito do desgaste é notoriamente menor do que a amostra sem proteção, evidenciando uma redução na velocidade do ataque.

Esse fator pode ser explicado com base na teoria acerca de proteção galvânica por anodos de sacrifício, onde é reportado que a utilização de um metal mais ativo que a estrutura a ser protegida, como o Zinco, neste trabalho, imerso em um eletrólito, promoverá o fluxo de elétrons para a estrutura, tornando-a catódica, e desta formando reduzindo o ataque corrosivo na mesma. A Figura 10 apresenta o comparativo entre o ataque corrosivo nas duas estruturas.

Figura 10: Comparativo do ataque corrosivo.



FONTE: Primária

4.2. TAXA DE CORROSÃO

Além do aspecto visual, foi possível determinar a eficiência da proteção utilizando a taxa de corrosão, calculada a partir da Equação 1. A Tabela 4 mostra os dados necessários relativos ao estudo.

Tabela 4 - Análise da taxa de corrosão

Dados utilizados	
Comprimento (cm)	14
Largura (cm)	2,5
Densidade (g*cm ⁻³)	7,87
K	8,76E+04
t (h)	1248

Fonte: Primária.

Com isso determinou-se a taxa de corrosão apresentada por cada amostra submetida ao meio corrosivo, a Tabela 5 apresenta os resultados obtidos com o estudo.

Tabela 5 - Taxa de corrosão em milímetros por ano

Amostra	Taxa de corrosão (mm.ano ⁻¹)
M3	0,41
M7	0,89

FONTE: Primária.

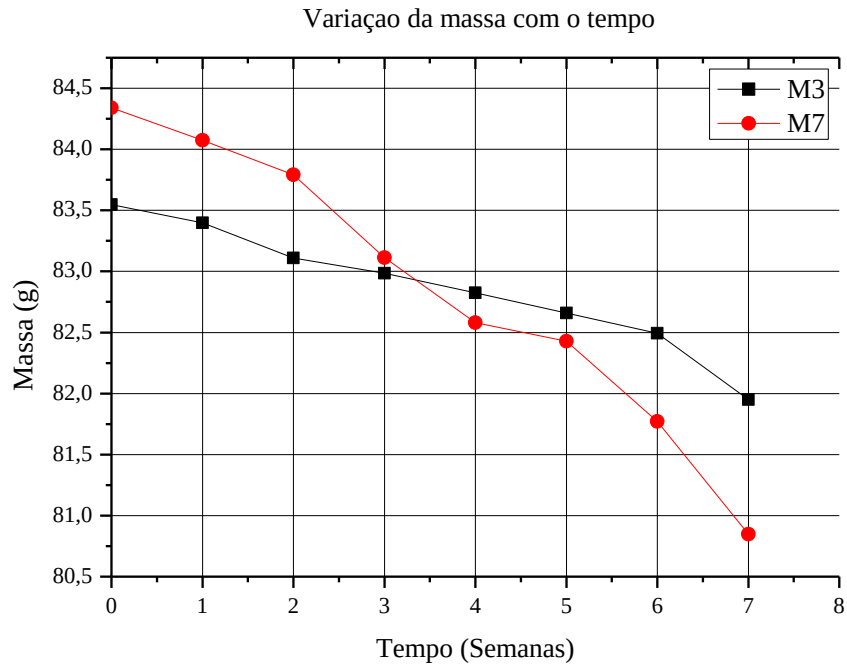
Observa-se uma larga diferença entre as taxas de corrosão apresentadas pelos metais, expondo a eficiência da semicélula na proteção do metal. Esse resultado, em conjunto com a análise visual apresentada, mostra que ocorreu redução considerável na velocidade de corrosão no metal com a semicélula.

Este fator pode ser justificado tendo em vista que o Zinco utilizado para a proteção é menos nobre que o metal protegido, com isso, fornece o potencial catódico necessário para a proteção do sistema, porém, é consumido ao realiza-lo, como citado por Eyres e Bruce (2012). O resultado obtido com a taxa de corrosão será refletido na próxima seção, onde será observado o comportamento da perda de massa das amostras ao longo do experimento.

4.3. ESTUDO DA PERDA DE MASSA DAS AMOSTRAS

A análise da perda de massa dividiu-se em duas etapas, a primeira verificou-se o comportamento individual das amostras ao longo das semanas, como observado na Figura 11.

Figura 11: Perda de massa com o tempo.



FONTE: Primária.

A partir da Figura 11 nota-se que a amostra M3 teve sua massa conservada de forma mais eficiente do que a amostra M7, indicando uma boa eficiência em seu sistema de proteção. A Tabela 6 apresenta os valores das massas dos metais ao longo das semanas.

Tabela 6 - Perda de massa com o tempo

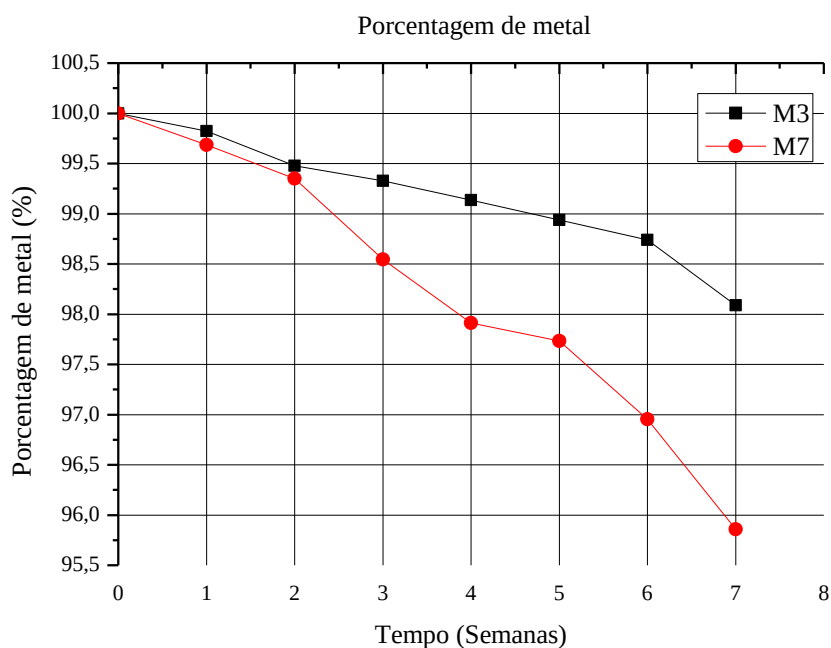
	Massa de M3	Massa de M7
Semana	(g)	(g)
0	83,546	84,34
1	83,3979	84,074
2	83,11	83,7926
3	82,9852	83,1135
4	82,8243	82,58
5	82,6582	82,4292
6	82,4935	81,7719
7	81,9496	80,8477

FONTE: Primária.

Observa-se que M7 apresentou uma redução de aproximadamente 3,49 g ao longo do experimento, enquanto a amostra M3, com o sistema de proteção, teve um déficit de quase 1,60 g, mostrando uma maior regularidade na preservação do material.

A segunda etapa foi à análise comparativa dos dois metais, esse procedimento observou o comportamento da porcentagem de metal das amostras ao longo do experimento, a Figura 12 aborda esse resultado.

Figura 12: Porcentagem de metal nas amostras.



FONTE: Primária.

É possível observar que a amostra M7 teve um comportamento bastante depreciativo, onde, em relação a sua massa inicial, perdeu quase 4,15% de massa ao fim do experimento. Enquanto isso, a amostra M3 perdeu menos da metade desse valor, com depreciação de aproximadamente 1,91% em relação a sua massa.

Esses resultados atestam a eficiência do sistema de proteção apresentado, onde a metodologia aplicada segue uma linha coerente com a teoria encontrada na literatura.

5. CONCLUSÃO

De forma teórica, o resultado obtido já era esperado, como o sistema de proteção catódica é uma metodologia bastante difundida, com eficiência comprovada, esse trabalho objetivou a apresentação do mesmo sistema, porém, com a vantagem de utilizar semicélulas de proteção que pudessem ser removidas quando necessário. Desta forma, os resultados obtidos atestaram que o método proposto apresenta grande potencial futuro.

A eficiência da proteção foi nítida ao longo do experimento, o aspecto visual, apresentado nas Figuras 8, 9 e 10, mostram grande diferença entre os sistemas com e sem proteção, evidenciando uma redução significativa na velocidade de corrosão, onde a amostra sem proteção sofreu forte ataque em toda sua extensão, enquanto o metal protegido mostrou-se mais preservado, com uma pequena área de impacto corrosivo.

O resultado ficou mais claro ao analisarmos a perda de massa do sistema, como também a taxa de corrosão. Com a taxa de corrosão, verificou-se que o ataque corrosivo foi mais contido, apresentado taxa de aproximadamente $0,41 \text{ mm.ano}^{-1}$. Já o sistema sem proteção alcançou a marca de $0,89 \text{ mm.ano}^{-1}$, acarretando em um grau acentuado de corrosão na extensão do metal. Fator que pode ser acompanhado também com a verificação da perda de massa, enquanto o metal sem proteção finalizou o experimento com a marca de 95,85% de metal, a amostra com a metodologia proposta para a proteção conseguiu manter, aproximadamente, 98% do metal inicial.

Apesar de ser um trabalho inicial, é notória a eficiência do método apresentado. Foram obtidos resultados satisfatórios, e coerentes com o objetivo do estudo. Desta forma, é observado que a aplicação do sistema de proteção por semicélulas removíveis, e portáteis, tem grande potencial de proteção, e viabiliza novos meios para o combate da corrosão.

6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1**: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens, 1999.
- ARAÚJO, Giovanni Moraes de. **Segurança na armazenagem, manuseio e transporte de produtos perigosos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Gvc, 2005. 948 p.
- BHATT, Vasishta. Thermodynamics and Kinetics of Complex Formation. **Essentials Of Coordination Chemistry**, [s.l.], p.111-137, 2016. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803895-6.00004-5>.
- EYRES, D.j.; BRUCE, G.j.. Corrosion control and antifouling systems. **Ship Construction**, [s.l.], p.327-343, 2012. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-097239-8.00027-1>.
- FELIPE, M. B. M. C. et al. General Aspects of Corrosion and Plant Inhibitors. **Revista Virtual de Química**, [s.l.], v. 5, n. 4, p.746-759, 2013. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20130053>.
- FRAUCHES-SANTOS, Cristiane et al. The Corrosion and the Anticorrosion Agents. **Revista Virtual de Química**, [s.l.], v. 6, n. 2, p.293-309, 2014. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140021>.
- GENTIL, V. **Corrosão**. LTC, 3º. ed., Rio de Janeiro: LTC, 1996, 345 p.
- GENTIL, V. **Corrosão**. LTC, 4º. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**, 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 360 p.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 353 p.
- GONÇALVES, Andreia Maria da Conceição. **Efeitos Galvânicos na Utilização Seletiva do Aço Inoxidável no Betão**. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Tecnológica, Departamento de Química e Bioquímica, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.
- IEC - Instalações e Engenharia de Corrosão – **Sistemas de Proteção Catódica**, Ed. Diagraphic, 1990.
- KINA, Aline Yae. **INIBIDORES DE CORROSÃO PARA SISTEMAS DE AÇO CARBONO SUBMETIDOS A MEIOS DE ALTA SALINIDADE E PRESENÇA DE**

CO2. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011

KOCH, Gerhardus. Cost of corrosion. **Trends In Oil And Gas Corrosion Research And Technologies**, [s.l.], p.3-30, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-101105-8.00001-2>.

MAINIER, F. B. Material do curso Corrosão e Inibidores. In: Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

MAINIER, Fernando B.; SANDRES, Gisele C.; TAVARES, Sérgio Souto Maior. CORROSÃO POR SULFETO DE HIDROGÊNIO (H₂S) E SUAS IMPLICAÇÕES NO MEIO AMBIENTE E NA SEGURANÇA INDUSTRIAL. **8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica**, Cusco, Peru, 2007.

MERÇON, Fábio; GUIMARÃES, Pedro Ivo Canesso; MAINIER, Fernando Benedito. Corrosão: Um exemplo usual de fenômeno químico. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 19, p.11-14, mar. 2004.

MORITA, Tokio; ASSUMPÇÃO, Rosely Maria Viegas. **MANUAL DE SOLUÇÕES, REAGENTES E SOLVENTES: PADRONIZAÇÃO - PREPARAÇÃO - PURIFICAÇÃO**. 12. ed: Edgard Blucher Ltda, 2003.

REVIE, R. Winston; UHLIG, Herbert H.. **CORROSION AND CORROSION CONTROL: An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 512 p.

RODRIGUES, Joaquim Correia. **ANODOS DE SACRIFÍCIO PARA PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, Rodrigo Sanchotene et al. Smart Paint for anodic protection of steel. **Progress In Organic Coatings**, [s.l.], v. 78, p.116-123, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.10.002>.

VAZ, Ednilson Luiz Silva; ACCIARI, Heloisa Andréa; CODARO, Eduardo Norberto. Um método para avaliar a taxa de corrosão. **Química Nova**, [s.l.], v. 34, n. 7, p.1288-1290, 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422011000700031>.

WALKER, R.; WARD, A.. The theory and practice of anodic protection. **Metallurgical Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.143-151, jan. 1969. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1179/mtlr.1969.14.1.143>.