



**KARINA VILELA RODRIGUES**

**TECHNICAL FEASIBILITY OF SACRIFICIAL ANODES TO  
AVOID CORROSION ON GALVANIZED STEEL DURING  
FERTIGATION**

**LAVRAS-MG  
2023**

**KARINA VILELA RODRIGUES**

**TECHNICAL FEASIBILITY OF SACRIFICIAL ANODES TO AVOID CORROSION  
ON GALVANIZED STEEL DURING FERTIGATION**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Recursos Hídricos, área de  
concentração em Irrigação, para a obtenção do título  
de Doutor.

Prof. Dr. Luiz Antonio Lima  
Orientador  
Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Rodrigues, Karina Vilela.

Technical feasibility of sacrificial anodes to avoid corrosion on  
galvanized steel during fertigation / Karina Vilela Rodrigues. -  
2023.

66 p. : il.

Orientador(a): Luiz Antonio Lima.

Coorientador(a): Michael Silveira Thebaldi.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Irrigação. 2. Proteção Catódica. 3. Perda de Massa. I. Lima,  
Luiz Antonio. II. Thebaldi, Michael Silveira. III. Título.

**KARINA VILELA RODRIGUES**

**VIABILIDADE TÉCNICA DE ANODOS DE SACRIFÍCIO PARA EVITAR  
CORROSÃO EM AÇO GALVANIZADO DURANTE A FERTIRRIGAÇÃO**

**TECHNICAL FEASIBILITY OF SACRIFICIAL ANODES TO AVOID CORROSION  
ON GALVANIZED STEEL DURING FERTIGATION**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Recursos Hídricos, área de  
concentração em Irrigação, para a obtenção do título  
de Doutor.

APROVADA em 03 de fevereiro de 2023.  
Prof. Dr. Luiz Antonio Lima UFLA  
Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi UFLA  
Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto UFLA  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Tatiane Michele Popiolski UFLA  
Prof. Dr. Antônio Carlos Barreto IFTM

Prof. Dr. Luiz Antonio Lima  
Orientador  
Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à Deus e à Virgem Maria, por guiar meus caminhos e me fortalecer até o final dessa jornada.

Aos meus pais, Adriane e Heder, e toda minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Aos professores Luiz e Michael pelas orientações, paciência e disposição para ajudar nesta pesquisa.

Aos professores que se dispuseram a participar das bancas de qualificação e defesa, os quais contribuíram para melhorias neste trabalho e também me presentearam com grandes aprendizados.

Aos amigos, colegas e funcionários do programa de pós-graduação em Recursos Hídricos, que participaram e contribuíram direta ou indiretamente nesta pesquisa, sempre com disposição e paciência.

Especialmente, ao Gabriel, por todo amor, apoio, paciência, companheirismo e contribuição em todos os momentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Muito obrigada!

## RESUMO GERAL

A corrosão, problema recorrente na irrigação, pode levar a ocorrência de vazamentos, interrupções nas atividades, diminuição da eficiência do sistema, entre outros, e sua magnitude está diretamente relacionada à composição química da solução que é escoada, podendo ser ainda maior com o uso da fertirrigação, pois fertilizantes se tornam corrosivos quando em contato com a água, e seu grau de corrosividade varia com o tipo da fonte e sua concentração. A proteção catódica é uma técnica utilizada para reduzir ou controlar a corrosão, em que é inserido um metal menos nobre na estrutura, sendo este consumido pela corrosão. O uso desta técnica associada ao revestimento da tubulação metálica pode ser utilizada para alcançar uma proteção significativamente maior, o que asseguraria a integridade da tubulação por mais tempo, porém, não é uma técnica comumente utilizada em redes de irrigação, o que faz com que estudos sejam necessários para verificar seus benefícios. Por este motivo, buscou-se avaliar a eficácia do uso da proteção catódica pelo método de anodos de sacrifício, para controle da corrosão causada por soluções de fertirrigação. Para isso foram realizados ensaios de imersão com soluções de Ureia e Cloreto de potássio (KCl), a  $10 \text{ g L}^{-1}$ , em contato com corpos de prova de aço galvanizado, com proteção catódica de anodos de zinco, alumínio e magnésio, além de um tratamento sem proteção, simulando 350 h de operação, a fim de obter a perda de massa por área dos corpos de prova de aço galvanizado e anodos. Também foi verificada a influência da razão de área catodo/anodo na proteção do aço galvanizado e no consumo do anodo alumínio, em solução de KCl. Os resultados mostraram que com o uso da proteção catódica é possível reduzir a perda de massa do aço galvanizado exposto a soluções de fertirrigação com KCl, e que o anodo de alumínio é o mais eficaz, já que, com seu uso, pode-se ter uma diminuição de até 78% na perda de massa em relação ao tratamento sem proteção; porém, para soluções contendo Ureia o uso deste método não foi eficaz. Com o aumento da razão de área catodo/anodo de alumínio não houve diferença expressiva na perda de massa do aço galvanizado e na perda de massa do anodo de alumínio, assim sendo mais viável o uso da maior razão (44:1).

**Palavras-chave:** Irrigação. Perda de Massa. Proteção Catódica. Testes de Imersão.

## GENERAL ABSTRACT

Corrosion, a recurrent problem in irrigation, can lead to leaks, interruptions in activities, reduced system efficiency, among others, and its magnitude is directly related to the chemical composition of the solution that is drained, and may be even greater with the use of fertigation, as fertilizers become corrosive when in contact with water, and its degree of corrosivity varies with the type of source and its concentration. Cathodic protection is a technique used to reduce or control corrosion, in which a less noble metal is inserted into the structure, which is consumed by corrosion. The use of this technique associated with the metallic piping coating can be used to achieve a significantly greater protection, which would ensure the integrity of the piping for a longer time, however, it is not a technique commonly used in irrigation networks, which makes studies are needed to verify your benefits. For this reason, we sought to evaluate the effectiveness of using cathodic protection using the sacrificial anode method to control corrosion caused by fertigation solutions. For this, immersion tests were carried out with solutions of Urea and Potassium Chloride (KCl), at  $10 \text{ g L}^{-1}$ , in contact with galvanized steel specimens, with cathodic protection of zinc, aluminum and magnesium anodes, in addition to a treatment without protection, simulating 350 hours of operation, in order to obtain the mass loss per area of the galvanized steel specimens and anodes. The influence of the cathode/anode area ratio on the protection of galvanized steel and on the consumption of aluminum anode in KCl solution was also verified. The results showed that with the use of cathodic protection it is possible to reduce the mass loss of galvanized steel exposed to KCl fertirrigation solutions, and that the aluminum anode is the most effective, since, with its use, one can have up to a 78% decrease in weight loss compared to unprotected treatment; however, for solutions containing Urea, the use of this method was not effective. With the increase in the aluminum cathode/anode area ratio, there was no significant difference in the weight loss of the galvanized steel and in the aluminum anode weight loss, thus making it more feasible to use the higher ratio (44:1).

**Keywords:** Irrigation. Mass Loss. Cathodic Protection. Immersion Test.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

- Figura 1 - Formas de corrosão: a) uniforme; b) pites; c) erosão; d) cavitação..... 14
- Figura 2 - Alterações na parede do tubo: a) tubo novo; b) incrustação; c) corrosão; d) tuberculização..... 16
- Figura 3 - Fluxo de corrente elétrica catodo/anodo.....23

### SEGUNDA PARTE

#### ARTIGO 1

- Fig. 1** pH (a) and CE (b) variation of Urea and KCl solutions, at  $10 \text{ g L}^{-1}$ , throughout the 10-yr simulation in contact with each evaluated anode-cathode set..... 37
- Fig. 2** Cathodic protection (CP) effect on mass loss of galvanized steel over time, using anodes of zinc (Zn), aluminum (Al) and magnesium (Mg), and without protection (control), in contact with solutions containing KCl (a) and Urea (b) at  $10 \text{ g L}^{-1}$ ..... 40

#### ARTIGO 2

- Figure 1 - Sketch of the galvanized steel specimens (a) and sacrificial anodes (b). .....49
- Figure 2 - Diagram of the experimental apparatus. ....52
- Figure 3 - Variation of pH (a) and EC (b) of KCl solutions at  $10 \text{ g L}^{-1}$  during the ten years of exposure of the galvanized steel specimens with cathodic protection and aluminum anodes without protection. .... 53
- Figure 4 - Comparison of the mass loss behavior of galvanized steel specimens in contact with KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$  with cathodic protection using Al anode and without protection. ....56
- Figure 5 - Mass loss behavior over the exposure time of Al anodes used as cathodic protection of galvanized steel specimens in contact with KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$  for different cathode/anode area ratios. ....60



## LISTA DE TABELAS

### PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 - Indicadores de ações corrosivas e incrustantes. ....	18
Tabela 2 - Série galvânica prática.....	24

### SEGUNDA PARTE

#### ARTIGO 1

<b>Table 1</b> Summary of the ANOVA of mass loss per area of galvanized steel in contact with solutions containing urea and KCl at 10 g L <sup>-1</sup> , for different cathodic protections and exposure times.....	38
<b>Table 2</b> Comparison of mass loss per area (mg cm <sup>-2</sup> ) of galvanized steel exposed to urea and potassium chloride (KCl) solutions, at 10 g L <sup>-1</sup> , for different materials used in cathodic protection by the sacrificial anode method.....	39

#### ARTIGO 2

Table 1 - Dimensional characterization and mass of the galvanized steel specimens. ....	50
Table 2 - Dimensional characterization and mass of Al anodes and their respective cathode/anode area ratios. ....	51
Table 3 - ANOVA summary of the mass loss by area of galvanized steel specimens with and without cathodic protection with Al anodes, different cathode/anode area ratios, and exposure time in KCl solution at 10 g L <sup>-1</sup> .....	55
Table 4 - Mass loss (mg cm <sup>-2</sup> ) of the galvanized steel specimens for each cathode/anode area ratio and exposure time in the KCl solution at 10 g L <sup>-1</sup> .....	57
Table 5 - ANOVA summary of the mass loss by area of Al anodes in contact with KCl solution at 10 g L <sup>-1</sup> used as cathodic protection for different cathode/anode area ratios and exposure times.....	58
Table 6 - Mass loss (mg cm <sup>-2</sup> ) of Al anodes used as cathodic protection of galvanized steel specimens in contact with KCl solution at 10 g L <sup>-1</sup> for different cathode/anode area ratios. ....	59

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO..... 11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral..... 11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos ..... 12</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO ..... 13</b>
<b>2.1</b>	<b>Corrosão ..... 13</b>
<b>2.2</b>	<b>Corrosão em sistemas de distribuição de água ..... 15</b>
<b>2.3</b>	<b>Qualidade da água ..... 17</b>
<b>2.4</b>	<b>Fertirrigação..... 19</b>
<b>2.5</b>	<b>Aço galvanizado ..... 20</b>
<b>2.6</b>	<b>Proteção catódica ..... 21</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS ..... 27</b>
	<b>REFERÊNCIAS..... 29</b>
<b>SEGUNDA PARTE</b>	
<b>ARTIGO 1</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUCTION..... 33</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL AND METHODS..... 35</b>
<b>2.1</b>	<b>Preparation of specimens..... 35</b>
<b>2.2</b>	<b>Immersion tests..... 35</b>
<b>2.3</b>	<b>Weight Loss experiment..... 36</b>
<b>2.4</b>	<b>pH and EC measurements..... 36</b>
<b>2.5</b>	<b>Statistical analysis..... 37</b>
<b>3</b>	<b>RESULTS AND DISCUSSION..... 38</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONS..... 42</b>
	<b>REFERENCES..... 43</b>
<b>ARTIGO 2</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUCTION ..... 47</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL AND METHODS ..... 49</b>
<b>2.1</b>	<b>Specimen preparation..... 49</b>
<b>2.2</b>	<b>Immersion tests ..... 51</b>
<b>2.3</b>	<b>pH and EC monitoring ..... 52</b>
<b>2.4</b>	<b>Statistical analysis ..... 53</b>

<b>3</b>	<b>RESULTS AND DISCUSSION .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b>	<b>Mass loss of galvanized steel .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2</b>	<b>Mass consumption of the galvanic anode .....</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERENCES.....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um dos maiores problemas em sistemas de irrigação, principalmente no do tipo pivô central, já que possui muitas partes metálicas, podendo causar perdas econômicas relevantes devido a substituição de componentes, suspensão não planejada de atividades, diminuição da eficiência do sistema, entre outros. Ainda, com a prática da fertirrigação pode-se ter um aumento do potencial corrosivo das soluções que são escoadas pelo sistema de irrigação; variando conforme o tipo de fertilizante e da concentração da solução aplicada.

A linha lateral destes equipamentos, geralmente, é executada com tubos de aço galvanizado, muito utilizados na irrigação devido a sua boa resistência contra corrosão em meios aquosos, porém seu revestimento de zinco muitas vezes possui baixa qualidade, além de possuir imperfeições ao longo de seu comprimento (DELAUNOIS; VITRY, 2014), o que gera pontos de fragilidade que podem levar à corrosão acelerada na tubulação. Visto isso, uma das soluções para solucionar este problema seria o uso de técnicas complementares para aumentar a proteção contra a corrosão, como a utilização proteção catódica associada ao revestimento, visando aumentar a proteção contra corrosão e a vida útil da tubulação.

A aplicação da proteção catódica se torna mais simples e econômica quando a tubulação já possui revestimento, porém é importante que seja avaliada a razão de área entre a superfície metálica a ser protegida e o anodo (razão de área catodo/anodo), pois esta influencia o desempenho da técnica, ou seja, na velocidade de dissolução do anodo e na eficiência da proteção ao aço galvanizado com o aumento do tempo de exposição na solução de fertirrigação.

Além disso, a escolha do tipo de metal a ser utilizado como anodo de sacrifício deve ser feita de acordo com o ambiente no qual ele será aplicado, fazendo-se necessário estudos para orientar os consumidores de cada setor, principalmente na fertirrigação, pois não existem estudos sobre a possibilidade do uso de proteção catódica nestes sistemas.

### 1.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficácia da proteção catódica proporcionada por anodos de sacrifício em aço galvanizado utilizado na fertirrigação, expostos a soluções contendo os fertilizantes ureia e KCl, a  $10 \text{ g L}^{-1}$ , por 350 horas, simulando 10 anos de fertirrigação.

## 1.2 Objetivos específicos

- Estimar a perda de material causada pela corrosão nos corpos de prova de aço galvanizado;
- Verificar a eficiência de cada material utilizado como anodo de sacrifício, indicando qual material é mais eficaz na proteção contra a corrosão em sistemas que conduzem soluções de fertirrigação;
- Avaliar a influência da razão de área catodo/anodo na proteção do aço galvanizado, em solução de KCl, e no consumo do anodo de alumínio.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Corrosão

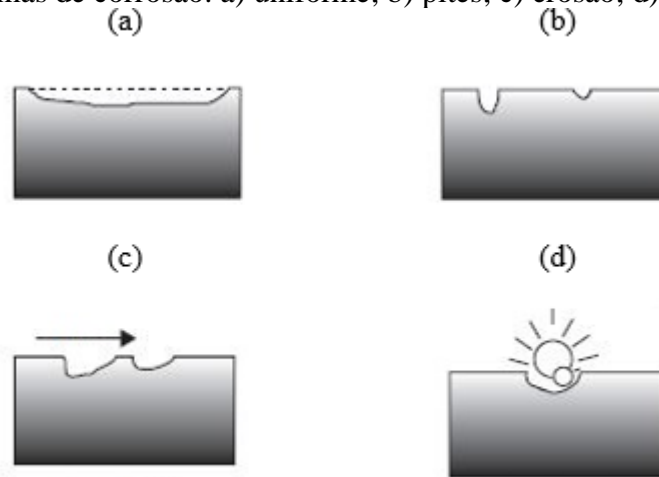
A corrosão é a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio em que se encontra (GENTIL, 2022). Em materiais metálicos é definida como um processo eletroquímico, considerado destrutivo e não intencional, que começa geralmente na superfície, causando grandes perdas financeiras por meio de suas consequências como: interrupções por falha de equipamentos, reparação ou substituição de componentes, custos de manutenção, contaminação do fluido e diminuição da eficiência do sistema (AMER et al., 2019).

As consequências desse tipo de corrosão são expressivas, estimando-se que aproximadamente 5% das receitas de uma nação industrializada sejam gastas com prevenção, manutenção ou substituição de produtos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). No Brasil, estima-se que o custo total esteja entre 3,5 a 4% do PIB (GENTIL, 2022). Portanto, é fundamental o emprego de técnicas para sua prevenção que, quando selecionadas e utilizadas de maneira correta, podem reduzir até 35% deste custo (KOCH et al., 2016; TEZDOGAN; DEMIREL, 2014).

Segundo Roberge (1999, 2008), estas são as definições de alguns dos principais tipos de corrosão, ilustrados na Figura 1.

- a) corrosão uniforme: caracterizada pelo ataque em grande parte da superfície metálica de modo uniforme (Figura 1a), sendo facilmente detectada e prevenida;
- b) corrosão por pite (*Pitting corrosion*): é uma forma localizada de corrosão, onde são formadas pequenas cavidades no material metálico (Figura 1b). Esta é considerada mais severa que a corrosão uniforme por ser difícil de premeditar, e por ter capacidade de levar equipamentos a falhas com pequenos pontos de corrosão;
- c) corrosão por erosão: ocorre por efeito acumulativo de degradações causadas por atrito entre um eletrólito e uma superfície (Figura 1c). A aceleração da erosão ocorre quando existe alta velocidade de fluido e desgaste mecânico por abrasão;
- d) cavitação: é uma forma de corrosão por erosão em que partículas do fluido tem efeito corrosivo (Figura 1d). Ocorre quando a pressão do líquido em movimento atinge sua pressão de vapor, assim formando bolhas de vapor que em alta velocidade desgastam as paredes metálicas.

Figura 1 - Formas de corrosão: a) uniforme; b) pites; c) erosão; d) cavitação.



Fonte: Adaptado de Roberge (1999).

Outro tipo de corrosão recorrente é a atmosférica, a ação corrosiva da atmosfera depende principalmente da umidade relativa, dos particulados e gases, da temperatura e do tempo de contato do eletrólito com a superfície metálica (GENTIL, 2022). Existem 4 tipos de corrosão atmosférica: industrial, marinha, rural e em ambientes internos, sendo a rural a menos agressiva, pois não contém grandes quantidades de contaminantes, se esta for localizada longe de grandes centros industriais (ROBERGE, 2008).

Outro tipo de corrosão muito comum é a corrosão galvânica, que é resultado do contato entre dois metais de ligas diferentes, e com diferentes potenciais, em um eletrólito, em que pela diferença de potencial ocorre uma transferência de elétrons, assim o metal menos nobre se torna o anodo, sendo consumido pela corrosão (AMER, et al., 2019; GENTIL, 2022). Este método também se adequa aos revestimentos, como exemplo, o revestimento de Zn em um metal a base de ferro, o Zn se torna o anodo, pois é menos nobre, e o ferro o cátodo, conseqüentemente a camada de Zn vai ser consumida pela corrosão, e ao longo do tempo vai diminuindo sua espessura ou formando cavidades (ROBERGE, 2008).

Além de soluções aquosas e também da atmosfera, solos também podem causar corrosão em estruturas metálicas, dependendo de suas composições, solos argilosos que contém concentração de cloretos, sulfatos e carbonatos podem causar a corrosão externa de tubulações ou estruturas enterradas (CAMITZ, 2001).

Testes de corrosão utilizando corpos de prova do material desejado podem otimizar o uso eficiente de sistemas de distribuição de água, promovendo o monitoramento da evolução da corrosão nesses sistemas. Assim, permitindo a aplicação de técnicas de proteção prévias e planos de manutenção, garantindo que o sistema trabalhe de forma contínua e sem a ocorrência

de problemas inesperados. Por exemplo, o que difere uma corrosão uniforme de uma corrosão por pites, que é mais severa, é o comportamento da taxa de corrosão sobre a superfície metálica exposta no meio corrosivo, sendo que, quando esta taxa ocorre de forma mais constante pode ser considerada como corrosão uniforme (SLAVÍČKOVÁ; GRÜNWARD; ŠŤASTNÝ, 2013).

O cálculo da taxa de corrosão é um dos métodos para a determinação do comportamento da corrosão ao longo do tempo e do prazo médio de duração dos componentes que estão sujeitos aos meios corrosivos. A taxa de corrosão, ou taxa de remoção de material como resultado da ação química ou eletroquímica, pode ser representada como perda de massa por área ou perda de espessura por unidade de tempo, a qual é determinada tanto pelo cálculo de perda de massa por área como por medição direta (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; SLAVÍČKOVÁ; GRÜNWARD; ŠŤASTNÝ, 2013).

A Norma SP-07-75 proposta pela National Association of Corrosion Engineers (NACE, 2013) classifica a taxa de corrosão como baixa ( $< 0,025 \text{ mm ano}^{-1}$ ), moderada ( $0,025$  a  $0,120 \text{ mm ano}^{-1}$ ), alta ( $0,130$  a  $0,250 \text{ mm ano}^{-1}$ ) e severa ( $> 0,250 \text{ mm ano}^{-1}$ ).

Segundo Dong et al. (2011) e Tsujino e Miyase (1981) a corrosão galvânica calculada a partir da densidade de corrente galvânica e a obtida pelo método da perda de massa devem ser similares. Ainda, de acordo com Dong et al. (2011), com o aumento da razão de área catodo/anodo, o método eletroquímico (densidade de corrente galvânica) pode não ser tão preciso em determinar o efeito deste tipo de corrosão.

## **2.2 Corrosão em sistemas de distribuição de água**

Para um bom dimensionamento hidráulico de sistemas de distribuição de água é necessário o conhecimento das características das tubulações, assim como suas condições de escoamento, para que seja escolhido o tipo de material. Tubos são na maioria das vezes conhecidos pelo seu material de constituição, como PVC, ferro fundido, aço, polietileno, entre outros. Cada tipo de tubulação apresenta suas vantagens e desvantagens, a seleção do tipo de material deve ser baseada analisando-se um conjunto de fatores como: pressão de trabalho, local, temperatura, sobrecargas externas, resistência ao escoamento e principalmente, o custo (CARVALHO, 2014).

O sucesso do dimensionamento de um projeto de irrigação está diretamente ligado a escolha do material e da qualidade da instalação das tubulações. Os materiais mais utilizados são o PVC, polietileno, aço galvanizado, alumínio e ferro fundido. A escolha também dependerá do tipo de linha de distribuição como linhas de sucção, recalque, laterais, entre

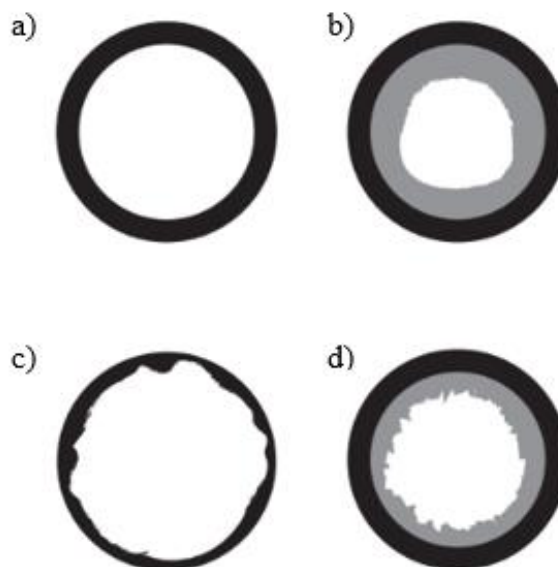


outras. Dos equipamentos que constituem um sistema de irrigação, os mais suscetíveis à corrosão são aqueles que compõem o sistema de bombeamento, a adutora e as linhas de distribuição de água quando são de material metálico, sendo que o tipo de material depende da demanda hidráulica do sistema (vazão e pressão de serviço), qualidade da água (corrosão e abrasão), grau de segurança requerido, sobrecargas externas e o custo-benefício (TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

A corrosão em um sistema de distribuição de água é um problema comum que pode gerar problemas como vazamentos e mudanças na capacidade hidráulica e na qualidade da água (SLAVÍČKOVÁ; GRÜNWARD; ŠŤASTNÝ, 2013). São vários os fatores que podem causar a corrosão em tubulações, como o tipo do material, a idade do tubo e até a reação química da composição da água remanescente na tubulação (BIGONI et al., 2014).

Existem três problemas recorrentes em sistemas de distribuição de água que são causados pela corrosão. O primeiro é a perda de material pela oxidação e desgaste do tubo (Figura 2c), fazendo que a tubulação perca sua resistência mecânica, o que resulta, principalmente, em vazamentos. O segundo é o acúmulo de depósitos nas paredes da tubulação, que causa o aumento da rugosidade (Figura 2b), e, conseqüentemente, aumentando a perda de carga. E por último, a contaminação da água causada pelos produtos de corrosão (MCNEILL; EDWARDS, 2001; SLAVÍČKOVÁ; GRÜNWARD; ŠŤASTNÝ, 2013).

Figura 2 - Alterações na parede do tubo: a) tubo novo; b) incrustação; c) corrosão; d) tuberculização.



Fonte: Adaptado de Azevedo Netto (2015).

Na investigação das causas das falhas no sistema de distribuição de água de municípios da Suécia durante os anos de 1974 a 1986 feita no estudo de Camitz (2001), mostrou que a corrosão foi responsável por mais de 50% das falhas em tubos de ferro fundido dúctil e em aproximadamente 100% das falhas nos tubos de aço carbono e aço galvanizado.

Uma das principais causas de falhas em sistemas de irrigação é a corrosão, ainda, de acordo com o estudo de Rodrigues, Lima e Thebaldi (2020) ela é ainda maior com o uso da fertirrigação. Entretanto, mesmo sendo responsável pela diminuição de sua vida útil, ela não é considerada uma grande causa, e conseqüentemente, não é tratada com devida importância. Falhas catastróficas podem ocorrer mesmo que a quantidade de metal destruída seja pequena, como a diminuição na espessura da camada de metal, ocasionando a perda da resistência à tração ou compressão do equipamento, diminuição da vida útil do mesmo, contaminação do fluido que escoar nas tubulações, entupimento dos emissores, perfuração da tubulação, e até danos a válvulas metálicas e bombas (EKER; YUKSEL, 2005).

### **2.3 Qualidade da água**

Segundo Gentil (2022), a água quimicamente pura é composta de moléculas que são associadas por ligações de hidrogênio, e que, todas as outras substâncias presentes como sais, ácidos, gases dissolvidos, partículas em suspensão e microrganismos, são consideradas impurezas. Portanto, deve-se adequar a água de acordo com sua finalidade, evitando problemas de utilização e corrosão causadas por essas impurezas.

A corrosão pode afetar negativamente a qualidade da água, sendo capaz de modificar sua coloração, turbidez, condutividade, o aumento da concentração de oxigênio dissolvido e íons de ferro (SLAVÍČKOVÁ; GRÜNWARD; ŠŤASTNÝ, 2013).

Algumas das propriedades químicas da água que aumentam sua corrosividade são o pH baixo, a alcalinidade, quantidade de sólidos dissolvidos, concentração de íons de cloreto e a quantidade de oxigênio dissolvido. Águas com baixas concentrações de íons de cálcio e Mg são mais agressivas, pois elas tendem a prevenir a formação de carbonato de cálcio sobre a superfície metálica, que poderia proteger o metal contra a corrosão (COLOMBO; OLDANI; TRASATTI, 2018; DELLA ROVERE et al., 2013; NWOYE et al., 2014). Além disso, sistemas de irrigação também são utilizados para a aplicação de fertilizantes e pesticidas, produtos que tem a capacidade de aumentar o potencial corrosivo das soluções de irrigação, reduzindo a vida útil das tubulações de aço galvanizado (LARUE, 2007).

A Norma NBR 12212 proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2017) aborda as condições exigidas para a elaboração de projetos de poços para captação de água subterrânea. A norma determina as variáveis que podem tornar a água corrosiva ou incrustante, sendo necessário a avaliação por exame bacteriológico e análise físico-química contemplando pH, temperatura, condutividade, sólidos totais, oxigênio dissolvido, alcalinidade, dureza, gás carbônico, acidez, gás sulfídrico, cloretos, sulfatos, ferro, manganês, amônia, cor, turbidez e sólidos em suspensão. Os indicadores usuais dessas ações estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Indicadores de ações corrosivas e incrustantes.

Ação corrosiva	Ação incrustante
pH < 5	pH > 8
OD > 2 mg L <sup>-1</sup>	Dureza ≥ 300 mg L <sup>-1</sup>
Presença de gás sulfídrico	Ferro ≥ 2 mg L <sup>-1</sup>
Sólidos totais dissolvidos > 1000 mg L <sup>-1</sup>	Manganês a pH ≥ 8: 1 mg L <sup>-1</sup>
Gás carbônico > 50 mg L <sup>-1</sup>	
Cloreto > 300 mg L <sup>-1</sup>	

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2017).

A ação incrustante da água também pode ser prevista pelo Índice de Saturação ou de Langelier (LSI), o qual indica a possibilidade de precipitação do carbonato de cálcio por meio da diferença entre o pH atual de uma água (pH<sub>a</sub>) e o pH dessa mesma água saturado com carbonato de cálcio (pH<sub>s</sub>). Este índice pode ser calculado desde que sejam conhecidos o pH real da água, sua temperatura, dureza, cálcio, alcalinidade metilorange e sólidos totais dissolvidos. Quando o resultado for positivo sugere-se a possibilidade de precipitação do carbonato de cálcio, quando negativo indica que não haverá precipitação, e quando for igual a zero sugere o equilíbrio de saturação, logo, sem formação de crostas (GENTIL, 2022).

Outro índice que prevê a ação incrustante ou corrosiva da água é o Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI), que é calculado pela diferença entre duas vezes o pH saturado com carbonato de cálcio (2pH<sub>s</sub>) e o pH atual da água (pH<sub>a</sub>). Quando o RSI ≤ 6,0 indica tendência à incrustação, quando o RSI > 7,0 sugere-se que não haverá deposição de carbonato de cálcio, e quando for 7,5 < RSI < 8,0 indica maior possibilidade de corrosão (GENTIL, 2022).

Segundo Gentil (2022) e Slavičková Grünwald e Šťastný (2013) na avaliação da ação corrosiva da água também devem ser consideradas suas características físicas como temperatura, fluxo, velocidade e ação mecânica, visto que, temperaturas elevadas podem

acelerar a corrosão e diminuir a solubilidade de gases, e que a velocidade de escoamento, geralmente, aumenta a taxa de corrosão, pois pode remover a camada de material corrosivo sobre a superfície metálica, a qual retarda o processo de corrosão.

## 2.4 Fertirrigação

A fertirrigação tem tido maior adesão nos últimos anos, pois utiliza o sistema de irrigação para aplicação de fertilizantes. Embora tenha muitas vantagens como a economia de mão de obra, diminuição de danos mecânicos às culturas, eficiência de uso e economia de fertilizantes, também existem as desvantagens, como a corrosão e a reação química dos fertilizantes dentro do sistema de irrigação (FRIZZONE et al., 2012).

Os sistemas de irrigação pressurizados são os que mais facilitam o uso de fertirrigação, em que a solução é aplicada e conduzida por condutos fechados sob pressão, possibilitando melhor controle da atividade. O sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central apresenta maior facilidade de aplicação, sendo muito indicado devido seu potencial de distribuição de água, propriedade exigida para o uso da fertirrigação (COSTA; BRITO, 1998; FRIZZONE et al., 2012).

Segundo Sunny e Hakkim (2016), fertilizantes próprios pra fertirrigação devem possuir as seguintes características:

- a) solubilidade completa em água;
- b) alta concentração de nutrientes disponíveis às plantas;
- c) dissolução rápida na água de irrigação;
- d) compatibilidade com outros fertilizantes;
- e) não causar grande mudança no pH da água;
- f) serem menos corrosivos ao sistema;
- g) não causar entupimento de emissores.

A solubilidade em água é o fator mais importante quando se trata de fertilizantes usados na fertirrigação, os nitrogenados são os mais solúveis em água, conseqüentemente, são os mais aplicados. As fontes potássicas, disponibilizadas principalmente em formas de cloretos e nitratos, tem solubilidade menor quando comparadas as nitrogenadas, exigindo cuidados em sua aplicação. Existem dois fatores que interferem na solubilidade de um fertilizante: sua pureza (concentração de nutriente) e a temperatura da água (BORGES; SILVA, 2009).

Os fertilizantes mais utilizados são aqueles que fornecem às plantas nitrogênio, proveniente de fontes como nitrato de amônio e ureia, potássio, oriundo de fontes como cloreto

de potássio (KCl), e fósforo. Fertilizantes em estado sólido, ou secos, não são corrosivos, no entanto, quando em contato com água ou umidade eles se tornam corrosivos, logo, quando praticada a fertirrigação eles são corrosivos ao sistema de irrigação (EKER; YUKSEL, 2005; OKI; ANAWE, 2015).

O potencial corrosivo da solução varia com o tipo de fertilizante a ser utilizado, dependendo de sua decomposição e reações que podem produzir substâncias agressivas, como amônia, sulfureto de hidrogênio e aqueles que possuem íons de cloreto, como o KCl. Ainda, a quantidade de nutriente necessária para a cultura também pode afetar o grau de corrosividade da solução (OKI; ANAWE, 2015), pois a partir dessa necessidade pode ser elevada a concentração de fertilizante da solução aplicada. De acordo com o estudo de Rodrigues, Lima e Thebaldi (2020), a corrosão em aço galvanizado aumenta com o uso da fertirrigação, assim como com o aumento da concentração de fertilizante.

Fertilizantes a base de nitrogênio são propensos a corrosão lenta quando em contato com aços carbono (ROFFEY, 2015). O nitrato de amônio e o ácido fosfórico estão entre os fertilizantes mais corrosivos ao aço galvanizado; a ureia é o menos corrosivo entre os fertilizantes nitrogenados, tendo pouca ou nenhuma corrosão em contato com o aço galvanizado (AMER et al., 2019; BORGES; SILVA, 2009).

## **2.5 Aço galvanizado**

O aço galvanizado possui uma camada de revestimento de Zn, sendo utilizado predominantemente para a proteção de corrosão em meios aquosos. Seu uso em grande escala é devido a características como boa resistência contra a corrosão, alta resistência a pressões internas, diversidade de diâmetros e espessuras e capacidade de absorção de carga sem rompimento (COLOMBO; OLDANI; TRASATTI, 2018; TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

Os revestimentos de Zn e ligas de Zn são muito utilizados para a proteção de componentes metálicos em meios corrosivos. O processo de fabricação que deposita esta camada de Zn sobre o metal é chamado de galvanização a quente, na qual ocorre a imersão do metal base em Zn líquido, depositando uma camada protetora, com finalidade de aumentar a resistência à corrosão do aço, impedindo o contato do metal base com o meio corrosivo (MARDER, 2000).

Segundo Gentil (2022), existem especificações para a indicação das espessuras adequadas para cada tipo de produto, as quais devem ser respeitadas para que sejam evitados

problemas na utilização do aço galvanizado. As técnicas mais empregadas utilizam zincagem entre 305 e 610 g m<sup>-2</sup> para obter espessuras entre 43 e 87 µm.

O revestimento de Zn ainda é considerado a maneira mais econômica de se prevenir a corrosão em tubulações metálicas, pois protege a corrosão do aço de duas maneiras: impedindo o contato do metal base com o meio corrosivo, e por proteção galvânica, em que o Zn é menos nobre que o ferro no meio onde estão inseridos. Com o revestimento agindo como um anodo de sacrifício, têm-se a formação de um filme sobre a superfície metálica ocasionando um preferencial de corrosão pelo mesmo. Ao mesmo tempo, o revestimento de Zn irá corroer a uma taxa menor que o metal base, aumentando seu período de proteção (DELLA ROVERE et al., 2013; MARDER, 2000).

Atualmente, quando se trata de tubulações metálicas utilizadas na irrigação, o aço galvanizado é mais empregado ao redor do mundo, principalmente, devido a seu custo-benefício em relação a proteção contra corrosão, no entanto, sua vida útil é dependente de vários fatores, sendo um dos principais a qualidade da água da irrigação, que pode ser corrosiva para este material (DELLA ROVERE et al., 2013; LARUE, 2007). A composição do fluido que passa pela tubulação afeta diretamente no aumento da corrosão no sistema, como águas com alta concentração de cloreto ou sulfato e pH baixo (COLOMBO; OLDANI; TRASATTI, 2018).

O aço galvanizado sofre corrosão mais severa quando o pH da água é muito ácido ou muito alcalino, portanto, é necessário que o pH da água que escoar pela tubulação esteja entre 6 e 10, para que a corrosão seja lenta, acima ou abaixo disso o processo de corrosão será acelerado. Se houver presença de íons de cobre na água, também é possível a aceleração da corrosão, pois os íons de cobre reagem com o Zn, conseqüentemente corroendo o revestimento (GENTIL, 2022). Ainda, de acordo com LaRue (2007), a vida útil da galvanização pode ser reduzida quando o fluido possui alta condutividade elétrica (CE) e pH abaixo de 5,4.

## **2.6 Proteção catódica**

Na corrosão eletroquímica, elétrons são cedidos em determinada região e recebidos em outra. O processo eletroquímico pode ser constituído em três etapas: o processo anódico, onde ocorre a passagem dos íons para a solução; o deslocamento dos elétrons e íons, em que elétrons das regiões anódicas se transferem para as regiões catódicas; e o processo catódico, no qual a área catódica recebe elétrons. A intensidade do processo de corrosão pode ser observada tanto pela quantidade de cargas de íons que passam do anodo para a solução quanto pela quantidade

de cargas de íons que se descarregam no catodo, pois os processos anódicos e catódicos são equivalentes (GENTIL, 2022).

Na reação anódica ocorre a oxidação do metal; já nas reações catódicas ocorre a redução, na qual têm-se a descarga de íons de hidrogênio produzindo gás. Quando dois materiais de origem metálica e com diferentes potenciais entram em contato na presença de um eletrólito, ocorre o que é conhecido como corrosão galvânica; neste caso ocorre transferência de carga elétrica de um metal para outro, podendo causar perfurações profundas no material metálico menos nobre, o qual funciona como anodo (GENTIL, 2022; ROBERGE, 1999).

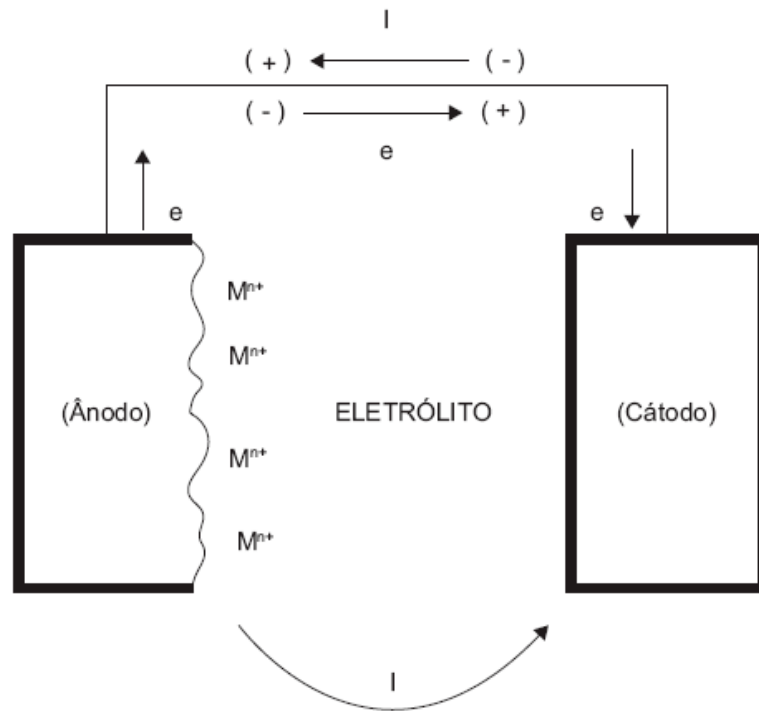
A proteção catódica é um método utilizado para impedir, reduzir ou controlar o processo de corrosão, que parte do princípio das pilhas eletroquímicas, de forma a apresentar quatro componentes: o anodo, eletrodo onde ocorre a corrosão; o eletrólito, que é o condutor, geralmente um líquido, que contém íons que transferem a corrente elétrica; o catodo, onde ocorre a reação de redução; e o circuito metálico, que é a ligação entre o anodo e catodo. Quando dois metais de ligas diferentes são imersos em um mesmo eletrólito, ocorre a chamada pilha galvânica, onde o material mais ativo se torna o anodo da pilha, portanto é corroído (GENTIL, 2022; LOTO; LOTO; POPOOLA, 2019).

Existem basicamente dois tipos de proteção catódica: por corrente impressa ou anodos de sacrifício. O último é realizado quando um metal mais ativo, ou seja, com um potencial mais eletronegativo, é conectado eletricamente e diretamente a uma estrutura metálica, geralmente, composta de um aço carbono, que deve ser protegida. Estes anodos podem ser manufaturados em diversas formas, sendo os metais mais utilizados o Zn, Al e Mg (GURRAPPÀ, 2005; LOTO; LOTO; POPOOLA, 2019). Além de não precisar de uma fonte externa de energia e ter baixo custo de implantação, o uso da proteção catódica por anodos de sacrifício é de simples instalação e manutenção (GURRAPPÀ, 2005; TEZDOGAN; DEMIREL, 2014).

A proteção catódica, geralmente, é utilizada para combater a corrosão em estruturas metálicas, submersas ou enterradas. A técnica consiste no processo de inserção de um metal menos nobre na estrutura metálica, em forma de pastilha ou de revestimento, para que este crie um preferencial de corrosão, atuando como o anodo de sacrifício, logo, sendo a estrutura protegida da corrosão (GENTIL, 2022; ROBERGE, 2008). Além da diferença de potencial, a técnica exige que exista uma CE constante no meio, para que haja circulação de corrente elétrica entre anodo e catodo continuamente (ARAÚJO; PANOSSIAN; LOURENÇO, 2013).

A Figura 3 mostra como é o processo da proteção catódica galvânica, e como ocorre o fluxo de corrente elétrica anodo/catodo.

Figura 3 - Fluxo de corrente elétrica catodo/anodo.



Fonte: Gentil (2022).

Neste processo de fluxo de corrente elétrica (Figura 3) ocorre a diferença de potencial entre o metal protegido (catodo) e o anodo, que tem potencial mais negativo (GENTIL, 2022). Para medir a diferença deste potencial é utilizado um eletrodo de referência, que possui um potencial fixo em relação ao meio corrosivo (CAMITZ, 2001).

A série galvânica consiste em uma tabela de potenciais com diferentes metais que possuem maior capacidade de fornecer proteção catódica galvânica à metais mais nobres, devido a seus potenciais mais negativos, agindo como anodos de sacrifício (GENTIL, 2022), por meio desta é possível fazer a escolha do melhor material para ser utilizado como anodo. Esta série está apresentada na Tabela 2.



Tabela 2 - Série galvânica prática.

Material	Potencial do eletrodo (Volts)
Magnésio comercialmente puro	-1,75
Liga de magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	-1,60
Zinco	-1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	-1,05
Alumínio comercialmente puro	-0,80
Aço (limpo)	- 0,50 a - 0,80
Aço enferrujado	- 0,20 a - 0,50
Ferro Fundido (não grafitizado)	- 0,50
Chumbo	- 0,50
Aço em concreto	- 0,20
Cobre, bronze, latão	- 0,20
Ferro fundido com alto teor de silício	- 0,20
Aço com carepa de laminação	- 0,20
Carbono, grafite, coque	+ 0,30

Legenda: Potenciais típicos normalmente observados em solos neutros e água, medidos em relação ao eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>. Valores um pouco diferentes podem ser encontrados em diferentes tipos de solos.

Fonte: Gentil (2022).

A proteção catódica em tubulações metálicas é alcançada quando existe a alimentação de uma corrente contínua do meio para o tubo, deslocando o potencial do tubo para o meio para um valor mais negativo através de uma fonte externa, como um anodo de sacrifício. Se o potencial não atingir a redução necessária não é possível a obtenção de uma proteção catódica completa, sendo alcançada somente uma diminuição na taxa de corrosão (CAMITZ, 2001).

Os metais mais utilizados como anodos de sacrifício são as ligas de Al, Mg e Zn. O Mg tem alto potencial eletronegativo, devido a isso é recomendado para uso na proteção de estruturas metálicas imersas em águas doces com baixa resistividade ou enterradas em solos com resistividade elétrica até 3000  $\Omega$ .cm. O Zn é recomendado para uso em água do mar ou em solos com resistividade elétrica até 1000  $\Omega$ .cm. E o Al é muito recomendado para uso em ambientes marinhos, pois tem boa performance em ambientes com alta CE como a água do mar. Dado que, esses limites de resistividade elétrica são determinados para que as diferenças de potenciais entre anodo e estrutura sejam pequenas, assim, sendo necessários circuitos de baixas resistências elétricas para a proteção catódica (GENTIL, 2022; GURRAPPÀ, 2005).

Anodos de liga de Al ficaram mais populares devido a suas vantagens em relação aos de ligas de Zn e Mg, como menor custo, maior tempo de vida e menor peso. Em sua composição, para uso comercial, geralmente contém 2 a 5% de Zn e outros elementos utilizados como ativadores, como o Índio (In). Para anodos com adição deste elemento o uso em água do

mar é muito recomendado, além disso, em meios que contém íons de cloreto este elemento promove a ativação do anodo de Al. No entanto, anodos de Al são limitados ao uso em soluções com alta CE, pois nestas possuem seu melhor desempenho (GURRAPPA, 2005).

Segundo Pryor e Keir (1958), o Al tem a capacidade de fornecer proteção catódica completa a componentes de aço em soluções que contém cloretos, e que a perda de massa do anodo é mínima se a solução possui pH entre 4 e 10. Em contrapartida, Francis, Turnbull e Hinds (2020) afirmam que em soluções neutras a taxa de corrosão para o Al e ligas de ferro pode aumentar quando o pH da solução é em torno de 4 e 5.

Quando bem dimensionada, a proteção catódica pode ser uma ótima alternativa para o combate a corrosão, até mesmo em tubulações já existentes. O conceito da utilização de proteção catódica foi pensado para solucionar a ocorrência contínua de vazamentos devido a corrosão em pequenos trechos de tubulações. No entanto, a aplicação de proteção catódica em sistemas já instalados muitas vezes se torna laborosa e de alto custo, sendo preferível a utilização em sistemas que ainda serão instalados. Além disso, a aplicação de proteção catódica em tubos é mais conveniente quando estes possuem juntas condutoras, como juntas soldadas, sendo necessário, caso as mesmas não forem condutoras, a conexão de cabos externamente (CAMITZ, 2001).

Muitas vezes o propósito da proteção catódica não é fornecer proteção máxima em qualquer condição, e sim de reduzir a possibilidade de altas taxas de corrosão por pites, o que prolonga a vida do sistema (CAMITZ, 2001). Visto isso, este tipo de proteção torna-se extremamente mais econômica e simples quando a superfície a ser protegida já é previamente revestida, como no caso do aço galvanizado, que possui revestimento de Zn. A qualidade deste revestimento, geralmente, não é muito boa, com espessura abaixo dos padrões exigidos em norma, além de possuir muitas imperfeições ao longo de seu comprimento (DELAUNOIS; VITRY, 2014), que podem causar uma corrosão acelerada na estrutura. Com o uso de proteção catódica combinada ao revestimento, é fornecida uma proteção contra corrosão significativamente maior (TEZDOGAN; DEMIREL, 2014), além de diminuir o número de anodos necessários ao longo da tubulação. Com uma proteção já pré-estabelecida, a corrente total necessária para a proteção é menor, assim, um anodo pode proteger uma sessão de tubo consideravelmente maior, reduzindo os custos com a proteção (SCHWEITZER, 2010).

A eficiência da proteção catódica com anodos de sacrifício depende de variáveis como: as propriedades dos materiais, geometria do anodo em relação ao catodo e do ambiente em que serão expostos (STANDISH et al., 2019). É muito importante na corrosão galvânica a relação entre a área anódica e catódica, pois esta influencia o desempenho da CP, quando têm-se uma

área catódica pequena em relação a área anódica, a corrosão não será tão grave, e para o contrário, uma área catódica muito maior que a anódica, a corrosão será acentuada na área anódica (GENTIL, 2022).

Segundo Atshan, Hasan e Ali (2013) a razão de área catodo/anodo tem grande influência no desempenho da proteção catódica, pois para uma determinada quantidade de corrente que flui em um par galvânico, o anodo com a menor área é mais danificado quando ocorre a corrosão. Ainda, Loto e Popoola (2011) afirmam quanto maior o anodo maior a quantidade de elétrons fornecida para proteger o cátodo, e maior o seu período substituição.

A razão de área catodo/anodo é muito importante para analisar a probabilidade de corrosão galvânica, a taxa de dissolução do anodo é proporcional à esta, quanto maior a razão maior será a corrosão no anodo (FRANCIS; TURNBULL; HINDS, 2020; JAFAR, 2017; NAKATSUGAWA; CHINO, 2021; TSUJINO; MIYASE, 1981).

Apesar de para algumas aplicações de proteção catódica existirem recomendações de relação entre a área da superfície metálica a ser protegida e a massa de anodo de sacrifício necessária, ainda não existem modelos matemáticos que demonstrem a influência da proporção de área catodo/anodo no consumo do anodo com o tempo de exposição à solução corrosiva (NEZGODA; GOUDAR; BRASIL, 2016).

### 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tubulações metálicas utilizadas em sistemas de irrigação geralmente são de aço galvanizado devido ao seu revestimento de Zn, que protege a tubulação da corrosão, problema recorrente nestes sistemas, principalmente devido à qualidade das soluções irrigadas. Além disso, a fonte de água disponível, normalmente, vem de poços, rios ou lagoas mais próximas, não sendo tratada e muitas vezes com características que podem aumentar a incidência de corrosão. Então, com o uso de fertirrigação é possível aumentar ainda mais a corrosividade da solução, a depender do tipo de fertilizante e de sua combinação com a água disponível.

A corrosão é um fenômeno difícil de ser evitado e estimado, pois depende de muitas variáveis, as quais podem alterar completamente seu comportamento e intensidade. Por isso é importante a utilização de técnicas preventivas, para que seja garantida maior proteção ao sistema. Mesmo que com o uso do aço galvanizado seja implicada uma proteção contra corrosão não há nenhuma garantia de sucesso, já que a qualidade do revestimento muitas vezes é baixa, além de possuir imperfeições ao longo de sua extensão, podendo causar corrosão acelerada nestes pontos, causando vazamentos e outros transtornos, fazendo-se necessárias interrupções da irrigação para manutenção ou até mesmo substituição de componentes, gerando perda de produtividade e custos ao irrigante.

Para evitar estes pontos de corrosão acelerada pode ser utilizada proteção catódica com anodos de sacrifício associada ao revestimento, o que aumenta a proteção contra a corrosão e assegura a integridade da tubulação por mais tempo. No entanto, o uso desta técnica em sistemas de irrigação precisa ser estudado de maneira mais ampla, pois o tipo de anodo pode variar com o ambiente e solução utilizados. Além disso, não é comum o uso desta técnica nestes sistemas, mesmo que esta seja bem estabelecida e aplicada em uma grande diversidade de sistemas de distribuição de água.

Estes fatos definem a importância deste estudo, que não só oferece dados do comportamento da corrosão com o uso de fertirrigação, fenômeno que ainda é pouco explorado na área, mas também oferece a possibilidade da avaliação de soluções para a mitigação deste problema.

No primeiro artigo foi possível afirmar que com o uso de anodos de sacrifício é possível obter uma diminuição significativa na perda de massa do aço galvanizado, causada por soluções de KCl utilizadas na fertirrigação e que entre os materiais de anodo testados, o Al é o mais indicado para este tipo de aplicação, porém, o uso da técnica não foi efetivo na simulação com soluções à base de ureia.

No segundo artigo foi estudado apenas o cenário de maior eficiência na proteção catódica, ou seja, o uso de anodos de Al para proteção do aço galvanizado em contato com solução de KCl, assim, foi possível explorar outras variáveis necessárias para o uso da técnica de maneira mais efetiva. Para isso foi avaliada a influência da razão de área catodo/anodo de Al na proteção do aço galvanizado (catodo) e no consumo do anodo. Esta razão pode influenciar o desempenho da proteção catódica, por isso a necessidade desta avaliação, visto que, para algumas aplicações já existem recomendações da relação entre área de superfície metálica a ser protegida e massa de anodo de sacrifício necessária para que seja atingida a maior proteção contra corrosão.

Com os resultados obtidos no segundo artigo foi validado o uso de anodos de Al para proteção do aço galvanizado em soluções de fertirrigação com KCl, não sendo identificada uma diferença expressiva na intensidade da corrosão com o aumento da razão de área catodo/anodo. Com o aumento dessa razão também não houve diferença relevante no consumo do anodo. Portanto, é mais viável o uso da maior proporção simulada, pois será necessária menor quantidade de anodos ao longo da tubulação.

No entanto, devido a algumas limitações metodológicas não foi possível afirmar qual a razão de área catodo/anodo deve ser utilizada para que seja obtido o melhor custo-benefício neste tipo de aplicação da proteção catódica, logo, sugere-se para trabalhos futuros uma investigação mais detalhada, para que seja possível calcular o número de anodos necessários em uma tubulação metálica utilizada na fertirrigação, abrangendo variáveis eletroquímicas como a corrente elétrica necessária para a proteção catódica, resistividade elétrica do eletrólito, densidade de corrente elétrica e capacidade de corrente do anodo.

## REFERÊNCIAS

- AMER, B. A. et al. Galvanic corrosion of steel in agitated vessels used in fertilizer industry. **Theoretical Foundations of Chemical Engineering**, v. 53, n. 2, p. 280-291, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1134/S0040579519020015>. Acesso em: 01 out. 2022.
- ARAÚJO, A.; PANOSSIAN, Z.; LOURENÇO, Z. Proteção catódica de estruturas de concreto. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 6, n. 2, p. 178-193, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952013000200002>. Acesso em: 28 ago. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12212**: Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.
- ATSHAN, A. A.; HASAN, B. O.; ALI, M. H. Effect of anode type and position on the cathodic protection of carbon steel in sea water. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 3, n. 5, p. 2017-2024, 2013. Disponível em: <http://inpressco.com/category/ijcet>. Acesso em: 12 out. 2022.
- AZEVEDO NETTO, J. M. de A. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.
- BIGONI, R. et al. Drinking water quality assessment and corrosion mitigation in the hospital water supply system of Chacas Village (Peru). **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 9, n. 3, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1407>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- BORGES, A. L.; SILVA, D. J. Fertilizantes para fertirrigação. *In*: BORGES, A. L.; COELHO, E. F. **Fertirrigação em fruteiras tropicais**. 2 ed. rev e amp. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2009. cap. 2, p. 20-37. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/658447/1/Fertirrigacao2009.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2018.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma Introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CAMITZ, G. Water mains and distribution pipes in soil – external corrosion and protection methods. **Water Supply**, v. 1, n. 3, p. 97-105, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2001.0057>. Acesso em: 25 jun. 2020.
- CARVALHO, J. de A.; Oliveira, L. F. C. de. **Instalações de bombeamento para irrigação: hidráulica e consumo de energia**. 2. ed. rev. e amp. Lavras: Ed. UFLA, 2014.
- COLOMBO, A.; OLDANI, L.; TRASATTI, S. P. Corrosion failure analysis of galvanized steel pipes in a closed water cooling system. **Engineering Failure Analysis**, v. 84, p. 46-58, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.10.008>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- COSTA, E. F.; BRITO, R. A. L. **Aplicador portátil de produtos químicos via água de irrigação**. Circular Técnica 13. Sete Lagoas: Embrapa, 1998.
- DELAUNOIS, F. F.; VITRY, T. V. Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems. **Bioelectrochemistry**, v. 97, p. 110-119, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.01.003>. Acesso em: 15 jan. 2022.

DELLA ROVERE, C. A. et al. Corrosion failure analysis of galvanized steel pipes in a water irrigation system. **Engineering Failure Analysis**, v. 33, p. 381-386, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.06.024>. Acesso em: 15 jan. 2018.

DONG, C. F. et al. Galvanic corrosion of a carbon steel-stainless steel couple in sulfide solutions. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 20, n. 9, p. 1631-1637, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9839-x>. Acesso em: 01 out. 2022.

EKER, B.; YUKSEL, E. Solutions to corrosion caused by agricultural chemicals. **Trakia Journal of Science**, v. 3, n. 7, p. 1-6, 2005. Disponível em: [http://tru.uni-sz.bg/tsj/vol3no7\\_1\\_files/eker\\_2\\_1\\_\[1\].pdf](http://tru.uni-sz.bg/tsj/vol3no7_1_files/eker_2_1_[1].pdf). Acesso em: 15 jan. 2018.

FRANCIS, R.; TURNBULL, A.; HINDS, G. **Bimetallic Corrosion, Guides for Good Practice in Corrosion Control, No. 5**. United Kingdom: National Physical Laboratory – NPL, 2020. Disponível em: <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/8617>. Acesso em: 01 out. 2022.

FRIZZONE, J. A. et al. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: EDUEM, 2012.

GENTIL, V. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GURRAPP, I. Cathodic protection of cooling water systems and selection of appropriate materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, p. 256–267, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.074>. Acesso em: 15 jan. 2022.

JAFAR, S. A. The Influence of Area Ratio, Temperature and Rotational Speed on Galvanic corrosion between Low Alloy Steel–Copper couple in 4%NaCl Solution. **Engineering and Technology Journal**, v. 35, n. 6, p. 617-623, 2017. Disponível em: <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=131979>. Acesso em: 05 out. 2022.

KOCH, G. et al. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. *In: NACE INTERNATIONAL IMPACT*, Houston, 2016. Disponível em: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2022.

LARUE, J. A review of center pivot pipeline solutions for various water qualities. *In: ASABE Annual International Meeting*, Paper Number: 072286, Minneapolis, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23382>. Acesso em: 15 jan. 2022.

LOTO, C. A.; LOTO, R. T.; POPOOLA, A. P. Performance evaluation of zinc anodes for cathodic protection of mild steel corrosion in HCl. **Chemical Data Collections**, v. 24, 100280, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.2338210.1016/j.cdc.2019.100280>. Acesso em: 15 jan. 2022.

LOTO, C. A.; POPOOLA, A. P. I. Effect of anode and size variations on the cathodic protection of mild steel in sea water and sulphuric acid. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 6, n. 12, p. 2861-2868, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5897/AJBM11.537>. Acesso em: 15 jan. 2022.

MARDER, A. R. The metallurgy of zinc-coated steel. **Progress in Materials Science**, v. 45, p. 191-271, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642598000061>. Acesso em: 23 ago. 2018.

MCNEILL, L. S.; EDWARDS, M. Iron pipe corrosion in distribution systems. **Journal American Water Works Association**, v. 93, n. 7, p. 88-100, 2001. Disponível em: [https://www.jstor.org/stable/41297605?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/41297605?seq=1#page_scan_tab_contents). Acesso em: 03 set. 2019.

NAKATSUGAWA, I.; CHINO, Y. Effect of Area Ratio on the Galvanic Corrosion of AZX611 Magnesium Alloy/A6N01 Aluminum Alloy Joint. **Materials Transactions**, v. 62, n. 12, p. 1764-1770, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.MT-L2021011>. Acesso em: 05 out. 2022.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE SP 07-75**: Preparation, installation, analyses, and interpretation of corrosion in oilfield operation. Houston, 2013.

NEZGODA, J.; GOUDAR, J. V.; BRASIL, S. L. D. C. Estudo das camadas calco-magnesianas formadas em superfícies metálicas sob proteção catódica. *In*: INTERCORR 2016, 2016, Búzios. **Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO)**. Disponível em: [https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2016/INTERCORR2016\\_300.pdf](https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2016/INTERCORR2016_300.pdf). Acesso em: 10 out. 2022.

NWOYE, C. I. et al. Operational dependence of galvanized steel corrosion rate on its structural weight loss and immersion-point pH in sea water environment. **American Journal of Mining and Metallurgy**, v. 2, n. 4, p. 81–87, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12691/ajmm-2-4-4>. Acesso em: 15 jan. 2022.

OKI, M.; ANAWE, P. A. L. A Review of corrosion in agricultural industries. **Physical Science International Journal**, v. 5, n. 4, p. 216-222, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.9734/PSIJ/2015/14847>. Acesso em: 15 jan. 2022.

PRYOR, M. J.; KEIR, D. S. Galvanic Corrosion: II. Effect of pH and Dissolved Oxygen Concentration on the Aluminum-Steel Couple. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 105, n. 11, p. 629-635, 1958. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2428681>. Acesso em: 01 out. 2022.

ROBERGE, P. R. **Corrosion engineering**: principles and practice. McGraw-Hill, 2008. Disponível em: <http://197.14.51.10:81/pmb/MECANIQUE/Corrosion%20Engineering%20Principles%20and%20Practice.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2018.

ROBERGE, P. R. **Handbook of corrosion engineering**. McGraw-Hill, 1999. Disponível em: <https://www.cntq.gov.br/cdb/documentos/quimica/197.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2018.

RODRIGUES, K. V.; LIMA, L. A.; THEBALDI, M. S. Effects of fertigation on corrosion in galvanized steel used in center pivot systems. **Water Supply**, v. 20, n. 4, p. 1189–1194, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2020.029>. Acesso em: 10 out. 2022.



ROFFEY, P. Corrosion-initiated rotating bending fatigue failure of a fertilizer conveyor belt head roller. **J. Fail Anal. and Preven.**, v. 15, p. 190-199, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11668-015-9930-y>. Acesso em: 02 fev. 2018.

SUNNY, C. S. A. C.; HAKKIM, V. M. A. Fertirrigation automation system for poly houses. **International Journal of Engineering Science and Computing**, v. 6, n. 11, 2016. Disponível em: <http://ijesc.org/upload/fbd892407f778dd459029ab5d0b32755.Fertigation%20Automation%20System%20for%20Poly%20Houses.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2018.

SCHWEITZER, P. A. **Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods**. CRC Press, 2010.

SLAVÍČKOVÁ, K.; GRÜNWARD, A.; ŠŤASTNÝ, B. Monitoring of the corrosion of pipes used for the drinking water treatment and supply. **Civil Engineering and Architecture**, v. 1, n. 3, p. 61-65, 2013. Disponível em: [http://www.hrpub.org/journals/article\\_info.php?aid=454](http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=454). Acesso em: 23 jul. 2020.

STANDISH, T. E. et al. Influence of area ratio and chloride concentration on the galvanic coupling of copper and carbon steel. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 166, n. 11, p. C3448-C3455, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0521911jes>. Acesso em: 13 fev. 2023.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. **Engenharia de Irrigação: tubos e acessórios**. Campinas: Unicamp - Faculdade de Engenharia Agrícola, 2015. Disponível em: [https://www.feagri.unicamp.br/irrigacao/index.php?option=com\\_attachments;task=download;id=31](https://www.feagri.unicamp.br/irrigacao/index.php?option=com_attachments;task=download;id=31). Acesso em: 01 dez. 2017.

TEZDOGAN, T.; DEMIREL, Y. K. An overview of marine corrosion protection with a focus on cathodic protection and coatings. **Brodogradnja/Shipbuilding**, v. 65, n. 2, p. 49-59, 2014. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/file/182425>. Acesso em: 15 jan. 2022.

TSUJINO, B.; MIYASE, S. On area ratio of anode to cathode for iron in neutral solution. **Corrosion**, v. 37, n. 9, p. 540-545, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.5006/1.3580803>. Acesso em: 05 out. 2022.

## Artigo 1

# SACRIFICIAL ANODES AS PROTECTION FOR CORROSION IN GALVANIZED STEEL USED IN FERTIGATION OF POTASSIUM CHLORIDE AND UREA SOLUTIONS

**This article is in the format in which it was submitted to the Arabian Journal for Science and Engineering (AJSE)**

## Abstract

Corrosion is one of the major causes of metallic pipes deterioration used in irrigation, such as galvanized steel. Its magnitude is directly linked to the quality of the water flowed by these pipes. Thus, the use of cathodic protection combined with pipe coating is used to achieve a greater protection. This study aimed to evaluate the effectiveness of using cathodic protection by the sacrificial anode method to reduce corrosion caused by fertigation solutions containing urea or potassium chloride, at  $10 \text{ g L}^{-1}$ , in specimens of galvanized steel, using Zn, Al and Mg anodes, in addition to a control treatment, without protection. For this, immersion tests were carried out to obtain the mass loss per area, by simulating 10 years of operation. The results showed that with the use of sacrificial anodes it is possible to reduce corrosion in galvanized steel caused by potassium chloride solutions for fertigation; however, this type of cathodic protection may not be effective in protecting urea-containing solutions from corrosion. The aluminum anode is the most suitable to use in solutions with high electrical conductivity, as it can reduce potassium chloride corrosion by up to 78% compared to the unprotected treatment.

**Keywords:** Cathodic protection. Irrigation. Immersion test. Weight loss. Zinc coating.

## 1 INTRODUCTION

Generally, the life expectancy of pipelines used in irrigation is at least 20 years. However, [1] reports that there are cases in which the structure begins to present leaks after 7 years of use. Due to this, manufacturers have started to attribute improvements to pipes, such as: paintings, epoxy and zinc coatings, and cathodic protections, such as magnesium anodes. Currently, galvanized steel (GS) pipes are the most used around the world, mainly due to their cost-effectiveness in relation to corrosion protection, however, their useful life depends on

several factors, one of the main being the quality of irrigation water, which can be corrosive to this material [1, 2].

There are several factors that can increase the corrosive potential of aqueous solutions: pH, dissolved oxygen, temperature, chloride ion concentration, fluid velocity, dissolved solids, among others [2, 3]. In addition, irrigation systems are also used for the application of fertilizers and pesticides, products that can increase the corrosive potential of irrigation solutions, thus reducing the useful life of GS pipes [1].

The corrosive potential of the solution varies with the type of fertilizer to be used, depending on its composition and reactions that can produce aggressive substances, especially those that have chloride ions, such as potassium chloride (KCl). Furthermore, the amount of nutrient required by crops can also affect the corrosiveness of the solution [4], as the concentration of the applied solution depends on it.

The damage caused by corrosion generates costs with replacement of equipment, unplanned suspension of activities, contamination of the transported solution and system efficiency reduction [5]. According to Koch et al. [6], in 2013, approximately 152.7 billion dollars were spent on losses generated by corrosion in global agriculture. Therefore, it is essential to employ techniques for its prevention that, when correctly selected and used, can reduce this cost by up to 35% [6, 7].

Cathodic protection (CP) is a method used to prevent, reduce or control the corrosion process, having basically two types: impressed current (ICCP) and sacrificial anodes (SACP). The SACP is performed when two metals of different alloys are directly electrically connected and immersed in the same electrolyte, where the most active material becomes the anode, therefore, it is corroded. These anodes can be manufactured in different ways, and, the most used metals are zinc (Zn), aluminum (Al) and magnesium (Mg) [8-10]. For the SACP use there is no need of an external power source, it has a low implementation cost, and is simple to install and maintain [7, 8].

The quality of the zinc coating of GS pipes is generally not good, with a thickness below the standards required, in addition to having many imperfections along its length [11], which can cause accelerated corrosion of the structure. Aware of this problem, one of the solutions would be the use of CP combined with pipe coating, which promotes significantly greater corrosion protection [7], in addition to reducing the number of anodes needed along the pipe [5].

It is a fact that the use of CP reduces the corrosion process, as seen in several studies carried out (e.g., 10, 12-14); and that the type of metal to be used as a sacrificial anode material

must be selected according to the environmental characteristics, in addition to other variables such as duration, weight and cost-effectiveness. Thus, studies are needed to guide consumers in each economy sector.

For this reason, the objective of this study was to evaluate the effectiveness of CP provided by sacrificial anodes of different materials in GS used for irrigation, exposed for 350 hours to solutions containing fertilizers, simulating 10 years of fertigation.

## **2 MATERIAL AND METHODS**

### **2.1 Preparation of specimens**

The GS specimens were manufactured with a material similar to that used in irrigation pipelines, with average dimensions of:  $100.76 \pm 0.33$  mm in width,  $100.79 \pm 0.33$  mm in height,  $3.88 \pm 0.04$  mm in thickness, and a central hole with  $10.09 \pm 0.65$  mm diameter, which resulted in an average area of  $215.91 \pm 1.30$  cm<sup>2</sup>. The average mass of the GS specimens was  $299.52 \pm 3.41$  g

The anodes had the same machining, with  $20.72 \pm 0.078$  mm of external diameter,  $6.28 \pm 0.043$  mm of internal diameter and  $6.34 \pm 0.015$  mm of thickness, resulting in an average area of  $8.65 \pm 0.09$  cm<sup>2</sup>, and a mean mass of  $5.2278 \pm 0.1309$  g,  $13.6099 \pm 0.2249$  g and  $3.4264 \pm 0.0580$  g, for Al [MIL-A-24779(SH) alloy], Zn (MIL-A-18001K alloy), and Mg [MIL-A-21412(SH) alloy], respectively. Therefore, the ratio of anode area to cathode area was approximately 4% (1:25).

Before the immersion tests the GS specimens were cleaned to remove possible impurities from their surfaces, being sanded with 600 grit emery paper, rinsed in distilled water, degreased with acetone, rinsed with distilled water again and dried on a paper towel. After this procedure, they were weighed on a precision scale.

### **2.2 Immersion tests**

We evaluated the corrosion protection provided by sacrificial anodes in specimens of GS exposed to fertigation solutions by the weight loss over the exposure time. For this, immersion tests were carried out simulating 35 h of annual fertigation for a period of 10 years, so the exposure time was equal to 350 hours. The GS specimens were connected to three types of sacrificial anodes (Zn, Mg and Al), with copper wires (1.5 mm<sup>2</sup> diameter) and chrome steel

clamps, including a control treatment without the use of anodes, and added in individual beakers containing white potassium chloride (KCl) and urea solutions, at a concentration of  $10 \text{ g L}^{-1}$ , diluted in 1.1 L of distilled water, which was used to evaluate only the corrosive effect of the fertilizer, since a wide variety of water types can be used in irrigation systems, depending on the region and source type.

The solutions were renewed periodically, at each two cycles of 35 h, to simulate a real situation of central pivot pipeline with the frequent renewal of the solution.

### **2.3 Weight Loss experiment**

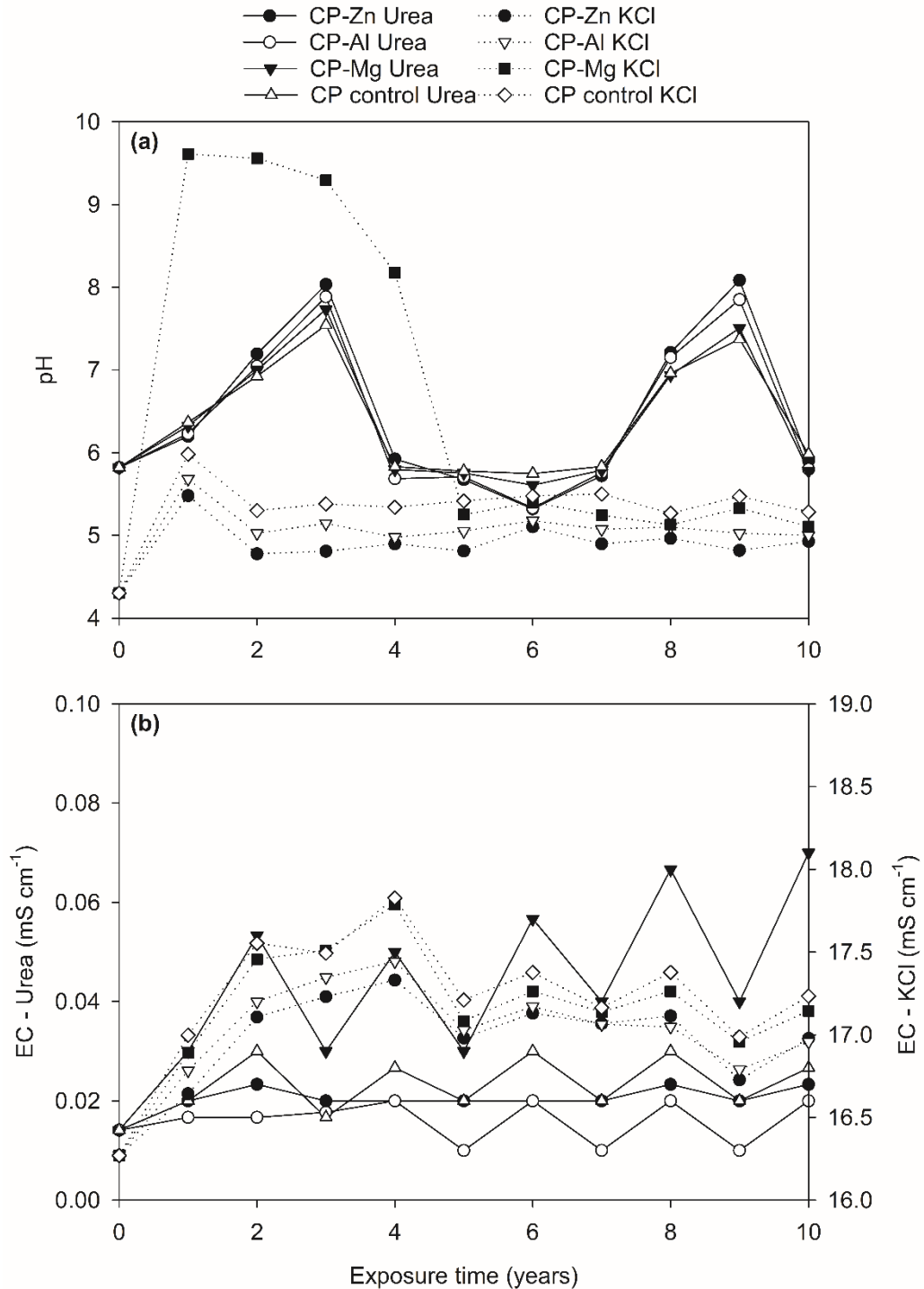
The mass loss per area of the specimens was calculated by the difference between the initial, before the immersion tests, and final mass, at each 35-h cycle, divided by the respective exposure area.

Before each weighing, after each 35-h cycle, the GS specimens and the sacrificial anodes were removed from the solutions, washed with distilled water, degreased with acetone and dried on paper towels.

### **2.4 pH and EC measurements**

During the immersion tests the electrical conductivity (EC) and pH of the solutions was monitored. Also, the experimental procedures were carried out at a controlled ambient temperature of  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . The initial solutions had an average pH equal to  $6.4 \pm 0.6$  and  $4.6 \pm 0.2$ , and an average EC of  $0.010 \pm 0.002$  and  $16.86 \pm 0.35 \text{ mS cm}^{-1}$ , for urea and KCl, respectively.

The pH and EC variations of the solutions containing Urea and KCl, at  $10 \text{ g L}^{-1}$ , during the immersion tests can be seen in Figure 1.



**Fig. 1** pH (a) and CE (b) variation of Urea and KCl solutions, at  $10 \text{ g L}^{-1}$ , throughout the 10-yr simulation in contact with each evaluated anode-cathode set

## 2.5 Statistical analysis

For the statistical analysis, a completely randomized design (CRD)  $4 \times 3$  was used, with 3 replications for each anode-cathode set. The analysis of variance (ANOVA) was performed using the F test. In case of a significant source of variation detection, the means were compared

by the Scott-Knott test, also at 5% probability. The analyses were performed with the softwares AgroEstat [15] and Sisvar [16].

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

The ANOVA for the mass loss per area of GS with CP of Zn, Al and Mg, in addition to a control treatment, without protection, exposed to urea solutions and KCl, at 10 g L<sup>-1</sup>, is shown in Table 1.

**Table 1** Summary of the ANOVA of mass loss per area of galvanized steel in contact with solutions containing urea and KCl at 10 g L<sup>-1</sup>, for different cathodic protections and exposure times

Source of variation	DF <sup>a</sup>	Mean square and F significance
Solution (S)	1	4.28*
Protection (P)	3	1.04*
Time (T)	9	0.65*
S x P	3	0.95*
S x T	9	1.24*
P x T	27	0.11*
S x P x T	27	0,13*
Residual	160	0.01
Total	239	-
Overall mean		0.31
Coefficient of variation		36.34 %

<sup>a</sup> degree of freedom and \* significant by the F-test at a 5% probability.

The solution properties, the type of material used for CP, and the exposure time had significant effects on material loss from GS, including interactions between these sources of variation (Table 1). Thus, the effects of solutions and protections on the average mass loss for each treatment can be seen in Table 2.

**Table 2** Comparison of mass loss per area ( $\text{mg cm}^{-2}$ ) of galvanized steel exposed to urea and potassium chloride (KCl) solutions, at  $10 \text{ g L}^{-1}$ , for different materials used in cathodic protection by the sacrificial anode method

Protection	Solution	
	KCl	Urea
Zn	0.71 aA	0.20 bB
Al	0.12 dA	0.15 cA
Mg	0.41 cA	0.26 aB
Control	0.55 bA	0.11 cB

Values followed by the same lowercase letter in the column and uppercase letter in the row do not differ significantly by the Scott–Knott test at 5% probability.

The KCl fertilizer caused a significantly greater mass loss than urea, except for the CP by Al anode, as can be seen in Table 2. This is due to the physicochemical properties of this solution, which is potentially more corrosive, since for the same concentration it has higher EC than urea, lower pH, as can be seen in Figure 1, in addition to chloride ions [4, 17]. According to LaRue [1], the useful life of galvanizing can be reduced when the fluid has a high EC and pH below 5.4.

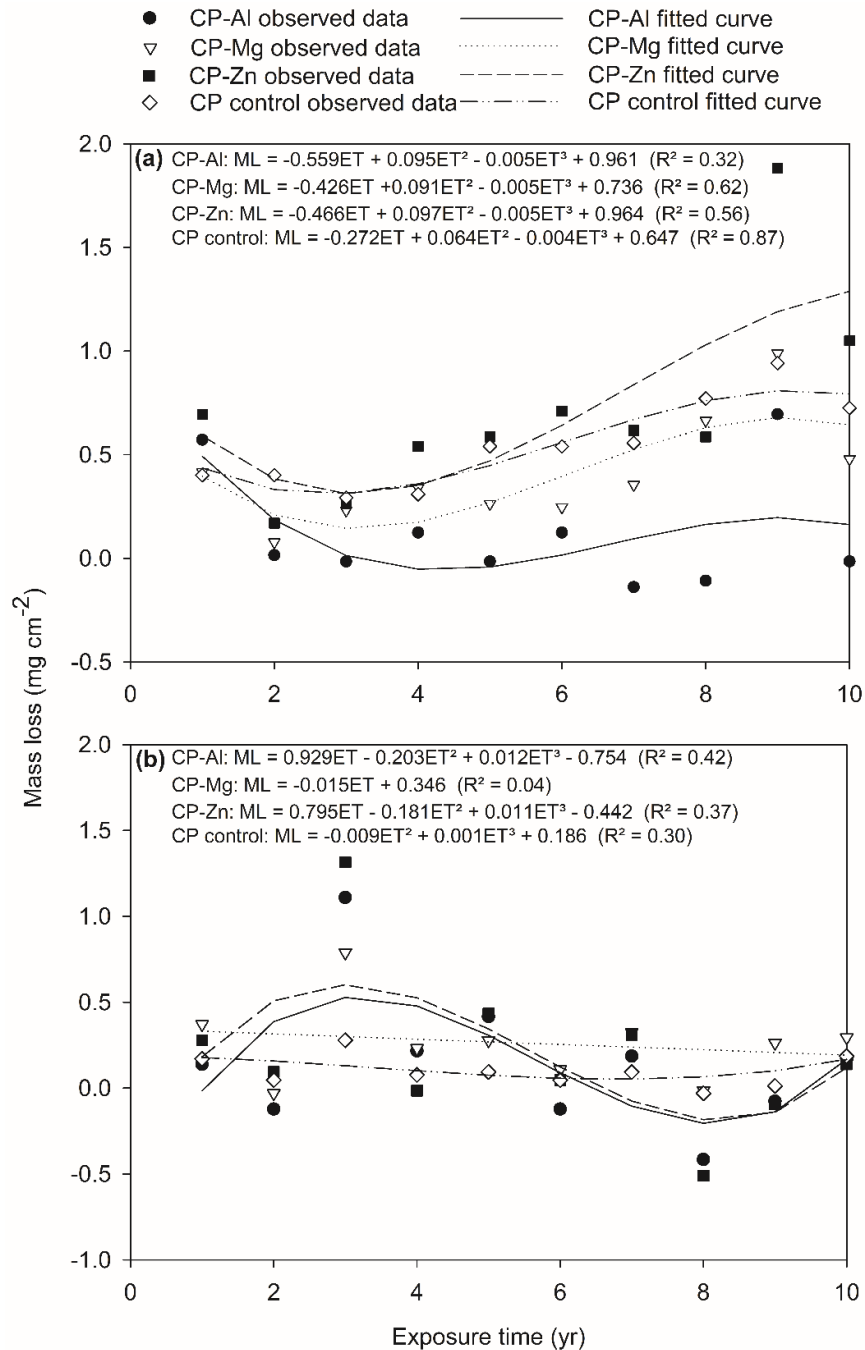
The Al and Mg anodes protections caused a significant reduction in mass loss of the GS specimens generated by the KCl solution, of approximately 78% and 25%, respectively, in relation to the unprotected treatment (control). This result agrees with the one obtained by Owoeye et al. [14], in which the mass loss of GS, exposed to seawater without protection was twice of the obtained for a CP using Al anode. This result also corroborates those obtained by Loto and Popoola [12], in which the Al anode was more effective in protecting mild steel immersed in seawater against corrosion, compared to the Zn anode.

However, for the urea solution, the use of sacrificial anodes did not reduce corrosion in the GS specimens, possibly due to the solution low EC. With few ions in the electrolyte, there is a difficulty to transport the electric current from the anode to the cathode, which causes the galvanic cell not to form and, consequently, reducing the CP possibility [9].

The effect of CP on the mass loss over time for GS, after 10 years exposure to solutions containing fertilizers, can be seen in Figure 2. It is possible to observe that the mass loss per area increased with the exposure time in the treatments in which the KCl solution was used (Figure 2a), as observed in Rodrigues et al. [18], however, to a lesser extent, except for the specimens connected to Al anodes, in which there was also the lowest mass loss.



It is important to note that negative values of mass loss represent a specimen mass gain. This indicates that corrosion has occurred, however, the result of the anode or specimen oxidation process (corrosion products), were not completely solubilized in the solutions, being deposited, and partially absorbed by the metallic surface, thus increasing the mass to the specimens. Thus, the mass loss generated by these corrosion events was not sufficient to surpass the mass gain.



**Fig. 2** Cathodic protection (CP) effect on mass loss of galvanized steel over time, using anodes of zinc (Zn), aluminum (Al) and magnesium (Mg), and without protection (control), in contact with solutions containing KCl (a) and Urea (b) at  $10 \text{ g L}^{-1}$ .

In general, for both solutions, the greatest mass loss occurred for the specimens connected to Zn anodes, as can be seen in Figure 2, indicating that the use of this CP was not efficient against corrosion. This result may be due to the fact that the GS already has a zinc coating as protection, thus, the effect of the Zn anode would be reduced, as it does not cause sufficient potential difference for the galvanic cell formation with the GS so, there is no effective CP [5, 9]. Also, a polarity inversion may have occurred, a process in which the galvanic potential of the materials changes under some specific condition. In this case the galvanized steel specimen would act as a sacrificial anode when coupled to the Zn anode, which is an alloy composed mainly of zinc, but containing other elements such as Al, Cd, Cu and Pb. As a result, the mass loss of the specimen connected to the Zn anode was greater than that of the specimen without protection [19-21].

When evaluating the CP in mild steel in contact with seawater, Loto and Popoola [12] also observed such behavior, with the mass loss for the unprotected treatment being lower than the one with CP by Zn anode. However, for more corrosive solutions, such as sulfuric and hydrochloric acid [10], the protection had a significant effect in mass loss decreasing. As in Loto and Popoola [12], it was also found that CP was more effective for the potentially more corrosive solution (for this study, the KCl solution), as can be seen in Table 2.

For the urea solutions (Figure 2b) the mass loss was practically constant for the specimens without protection (control) and for those connected to the Mg anodes. However, for the Al and Zn anodes, peaks in mass loss were observed, in the 1st, 3rd, 5th and 7th year of exposure, possibly due to the solution replacements.

This behavior was also verified for specimens exposed to KCl solution (Figure 2a), being possible to verify some peaks in mass loss specifically in the 1st, 3rd and 9th year, immediately after exchanging the solutions. Corrosion tends to decrease with an increasing exposure time in the same solution, as there is a formation of a zinc oxide layer, which acts as a protective film [3, 22], thus, the constant exchange of solutions, in addition to the specimens cleaning performed in each 35-h cycle, may have altered this film formation process.

In Figure 2 it is also possible to observe that the Mg anode promoted a significant reduction in mass loss in the first 3-yr exposure for the KCl solution, however, these were completely consumed in this period. As result, the specimens that were connected to them remained unprotected until the end of the simulation, so, they were analyzed under similar conditions as the control treatment. Because of this, its behavior resembled the unprotected treatment. The same occurred in Kapps et al. [23], where Mg anodes connected to a carbon steel

of commercial pipelines were completely consumed when exposed to a solution containing HCl with pH between 4.5 and 6.0, thus leaving the structure exposed until the end of the tests.

This event can be explained by the fact that Mg has a high electronegative potential, therefore, it was expected to be the most effective sacrificial anode, as it creates a greater potential differential when connected to GS [5, 9]. But, due to this, it is dissolved very quickly in solutions with high EC [8].

The high consumption of the Mg anode, when connected directly to the structure serving as a sacrificial anode, was also verified in Narozny et al. [24]. According to these authors, Mg can dissolve quickly in this type of solution due to the excess of protection current (i.e., an overprotection).

From the results obtained, it is possible to infer that the Al anode is the most suitable for irrigation systems flowing waters or fertilizer solutions that have high EC, since, according to Gurrappa [8] and Owwoye et al. al. [14], Al has a satisfactory performance in environments with this characteristic. Additionally, the Al anodes have advantages over other materials such as low cost and low weight [8], being ideal for structures that have weight limitations, as in metallic pipelines used in irrigation systems.

However, it is necessary to emphasize that the results found in this study refer to a simulated situation and may vary according to the modification of boundary conditions, such as the number of operating hours, fluid quality, depending on the combination of the water's characteristics with the fertilizer, which can change the corrosion behavior and intensity, and flow velocity, since the simulation of this work was performed under static fluid conditions, which may interfere with the speed of anode consumption. Therefore, the selection of the material type to be used as a sacrificial anode may vary according to the environment where it will be installed. For this reason, it is important to carry out preliminary studies.

#### **4 CONCLUSIONS**

With the sacrificial anode technique, it is possible to obtain a significant reduction in corrosion in GS caused by KCl solutions used in fertigation, however, this type of CP may not be effective in protecting GS pipelines from corrosion if they are flowing urea solutions. In this way, the selection of the material to be used as a sacrificial anode can vary according to the quality of the used fluid.

For the application of solutions with high EC, such as KCl solutions for fertigation, the Al anode provides the greatest protection against corrosion.

Magnesium, despite protecting GS against corrosion, is not effective as a sacrificial anode for fertigation solutions with high EC, due to the accelerated consumption of the anode.

The Zn anode is not effective in protecting GS against corrosion for KCl and urea solutions with a concentration of 10 g L<sup>-1</sup> due to the low potential differential between the protected and the protective material.

### **Acknowledgments**

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

### **Statements and Declarations**

The authors have no competing interests to declare that are relevant to the content of this article.

### **References**

1. LaRue, J.: A review of center pivot pipeline solutions for various water qualities. In: ASABE Meeting Presentation, Paper Number 072286. Minneapolis, Minnesota (2007).
2. Della Rovere, C.A., Silva, R., Moretti, C., Kuri, S.E.: Corrosion failure analysis of galvanized steel pipes in a water irrigation system. *Eng. Failure Anal.* 33, 381-386 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.06.024>
3. Nwoye, C.I., Chinwuko, E.C., Nwosu, I.E., Onyia, W.C., Amalu, N.I., Nwosu, P.C.: Operational dependence of galvanized steel corrosion rate on its structural weight loss and immersion-point pH in sea water environment. *Am. J. Min. Metall.* 2, 4, 81–87 (2014). <https://doi.org/10.12691/ajmm-2-4-4>
4. Oki, M., Anawe, P.A.L.: A Review of corrosion in agricultural industries. *Phys. Sci. Int. J.* 5, 4, 216-222 (2015). <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/14847>
5. Schweitzer, P.A.: *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*. CRC Press (2010).
6. Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., Payer, J.: *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*. In: NACE INTERNATIONAL IMPACT. Houston, USA (2016).

7. Tezdogan, T., Demirel, Y. K.: An overview of marine corrosion protection with a focus on cathodic protection and coatings. *Brodogradnja/Shipbuilding* 65, 2, 49-59 (2014).
8. Gurrappa, I.: Cathodic protection of cooling water systems and selection of appropriate materials. *J. Mater. Process. Technol.* 166, 256–267 (2005).  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.074>
9. Gentil, V.: *Corrosão*, 7 ed. LTC, Rio de Janeiro (2022).
10. Loto, C.A., Loto, R.T., Popoola, A.P.: Performance evaluation of zinc anodes for cathodic protection of mild steel corrosion in HCl. *Chem. Data Collect.* 24, 100280 (2019).  
<https://doi.org/10.1016/j.cdc.2019.100280>
11. Delaunois, F.F., Vitry, T.V.: Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems. *Bioelectrochemistry* 97, 110-119 (2014).  
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.01.003>
12. Loto, C.A., Popoola, A.P.I.: Effect of anode and size variations on the cathodic protection of mild steel in sea water and sulphuric acid. *International Journal of the Physical Sciences* 6, 12, 2861-2868 (2011). <https://doi.org/10.5897/AJBM11.537>
13. Refait, Ph., Jeannin, M., Sabot, R., Antony, H., Pineau, S.: Corrosion and cathodic protection of carbon steel in the tidal zone: Products, mechanisms and kinetics. *Corr. Sci.* 90, 375-382 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.035>
14. Owoeye, F.T., Adetunji, O.R. Kuye, S.I., Bada, B.S.: Cathodic Protection of Aluzinc coated, Galvanized and Stainless Steels in Ijegan Seawater using Aluminium as Sacrificial Anode. *United International Journal for Research & Technology* 2, 2, 81-92 (2020).
15. Barbosa, J.C., Maldonado Júnior, W.: *AgroEstat: Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos*. FCAV/UNESP, Jaboticabal (2015).
16. Ferreira, D.F.: SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria* 37, 4, 529-535 (2019).  
<https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
17. Lee, H., Rasheed, U., Kong, M.: A study on the comparison of corrosion in water supply pipes due to tap water (TW) and reclaimed water (RW). *Water* 10, 496, 1-21 (2018).  
<https://doi.org/10.3390/w10040496>
18. Rodrigues, K.V., Lima, L.A., Thebaldi, M.S.: Effects of fertigation on corrosion in galvanized steel used in center pivot systems. *Water Supply* 20, 4, 1189–1194 (2020).  
<https://doi.org/10.2166/ws.2020.029>
19. Zhang, X.G.: Galvanic Corrosion. In: *Uhlig's Corrosion Handbook*, 3 ed. John Wiley & Sons, Inc. (2011).

20. Macdonald, D.D., Lewis, M., McLafferty, J., Maya-Visuet, E., Peek, R.: Electromagnetic induction corrosion control technology (EICCT). *Materials and Corrosion* 69, 436-446 (2018). <https://doi.org/10.1002/maco.201709522>
21. Glover, C.F., Cain, T.W., Scully, J.R.: Performance of Mg-Sn surface alloys for the sacrificial cathodic protection of Mg alloy AZ31B-H24. *Corrosion Science* 149, 195-206 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.015>
22. Haque, M.M., Limon, S.A., Moniruzzaman, M.D., Bepari, M.D.M.A.: Corrosion comparison of galvanized steel and aluminum in aqueous environments. *Int. J. Automot. Mech. Eng.* 9, 1758-1767 (2014). <https://doi.org/10.15282/ijame.9.2013.24.0146>
23. Kapps, V., Simões, A.L.C., Custódio, A.B.: Experimentos de baixo custo em corrosão e proteção de dutos de aço em meios ácidos. *Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis* 7, 2, 23-38 (2012).
24. Narozny, M., Zakowski, K., Darowicki, K.: Method of sacrificial anode transistor-driving in cathodic protection system. *Corr. Sci.* 88, 275-279 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.041>

**Artigo 2****EFFECT OF CATHODE/ANODE AREA RATIO VARIATION ON THE CATHODIC PROTECTION OF GALVANIZED STEEL USED IN POTASSIUM CHLORIDE FERTIGATION****ABSTRACT**

Corrosion is one of the most significant problems in irrigation systems and fertigation may increase its damage. One of the solutions to mitigate this phenomenon would be using cathodic protection combined with piping coating so, it is essential to evaluate the type of sacrificial anodes and the cathode/anode area ratio, variables that change the performance of cathodic protection and its application cost. Thus, this study aimed to validate the effect of Al anodes on the corrosion protection of galvanized steel used in fertigation with KCl solution at 10 g L<sup>-1</sup> and verify the influence of the cathode/anode area ratio on the galvanized steel protection and anode consumption. Thus, immersion tests were conducted by simulating ten years of fertigation to determine the mass loss of the galvanized steel and Al anodes. The results showed that Al anodes significantly reduce the mass loss in galvanized steel exposed to KCl solution, but there is no significant difference in its mass loss with the increase in the cathode/anode area ratio. Regarding the Al anodes, there was also no significant difference in mass loss with the increase in the cathode/anode area ratio.

**Keywords:** Sacrificial Anodes. Corrosion. Irrigation. Mass Loss.

## 1 INTRODUCTION

Using fertigation in center pivot equipment is a reality (LARUE, 2022; LI et al., 2018; ZHAO et al., 2020). However, the literature does not explore the possible damage caused by this practice. Rodrigues, Lima, and Thebaldi (2020) found that fertigation in irrigation systems increases corrosion in galvanized steel pipes. The means of corrosion protection are also little explored, with some manufacturers use protection techniques, such as epoxy coating, or more corrosion-resistant materials, such as stainless and galvanized steel.

The pipe of a central pivot is generally made of galvanized steel. However, according to Delaunois and Vitry (2014), the quality of the Zn coating in galvanized steel is often not very good. It has imperfections along its length due to the manufacturing process, which can accelerate corrosion in the structure, especially at the fragile zones. Thus, questions arise, such as: is the corrosion protection provided by galvanizing enough to the steel used in fertigation? Does the thickness of the Zn coating layer of this material provide enough protection for the pipeline to meet its 20-year useful life expectancy (CORRÊA et al., 2023; LARUE, 2007)? Are complementary techniques used to increase corrosion protection in these pipelines?

Cathodic protection (CP) is a technique used to prevent or control corrosion on metal surfaces in water distribution systems. CP is established when two metals of different alloys are electrically connected in a conductive medium. The galvanic current flows from the less to more noble metal. Thus, the corrosion rate in the less noble metal will increase, being consumed by corrosion (AMER et al., 2019; FRANCIS; TURNBULL; HINDS, 2020).

The application of CP becomes simpler and more economical when the structure to be protected is previously coated. Thus, its objective is to complement the protective action of the coating (GENTIL, 2022), as occurs with galvanized steel. In this case, the CP associated with the coating can ensure the pipeline's integrity for longer.

Al, Zn, and Mg are the most used sacrificial anode materials. Al alloy anodes have become popular due to their lower cost, weight, and high efficiency. However, this alloy is limited to uses in solutions with high electrical conductivity (EC) since they perform better under these conditions (GURRAPPÀ, 2005; XI et al., 2022). According to Pryor and Keir (1958), Al can provide complete CP to steel components in solutions containing chlorides, and the mass loss of the anode is minimal if the solution has a pH between 4 and 10.

The efficiency of CP with sacrificial anodes depends on variables such as the material properties, anode geometry in relation to the cathode, and the environment to which they will



be exposed (STANDISH et al., 2019). The relationship between the anodic and cathodic areas is essential in galvanic corrosion since it influences the performance of the CP.

Corrosion will not be as severe when the cathodic area is smaller than the anodic area. In contrast, corrosion increases in the anodic area when it is much smaller than the cathodic area (GENTIL, 2022). Thus, the greater the cathode/anode area ratio for a given amount of current flowing between a galvanic pair, the greater the current density at the anode. Consequently, the greater its corrosion (ATSHAN; HASAN; ALI, 2013; FRANCIS; TURNBULL; HINDS, 2020; GENTIL, 2022; JAFAR, 2017).

Despite recommendations concerning the relationship between the metal surface area to be protected and the sacrificial anode mass required for some CP applications, there are still no mathematical models that determine the influence of the cathode/anode area ratio on the consumption of the anode with the time of exposure to the corrosive solution (NEZGODA; GOUDAR; BRASIL, 2016). Still, there are no recommendations for using sacrificial anodes to protect metal pipes used in irrigation and few studies on this type of application. In Article 1, the author proved that the best anode material to be used to protect galvanized steel for the KCl solution is Al.

Additionally, Dong et al. (2011) and Tsujino and Miyase (1981) state that the galvanic corrosion quantified from the galvanic current density and that obtained by the mass loss method should be similar. Dong et al. (2011) found that the electrochemical method may not be as accurate in determining the effect of galvanic corrosion with the increase in the cathode/anode area ratio.

Thus, this study aimed to validate the effect of using Al sacrificial anodes for corrosion protection of galvanized steel used in fertigation with KCl solution and evaluate the influence of the cathode/anode area ratio on the mass loss of galvanized steel and anode consumption.

## 2 MATERIAL AND METHODS

### 2.1 Specimen preparation

The galvanized steel specimens were produced with the same material used in pipes of Central Pivot irrigation systems in three sizes. Table 1 presents the dimensions and average masses. The specimen exposure area was calculated according to Equation 1. Figure 1 shows the sketch of the specimens and anodes.

$$A_{\text{exp}} = (2 \times W \times H) + (2 \times W \times t) + (2 \times H \times t) - \left( \frac{\pi \times D^2}{2} + \pi \times D \times t \right) \quad (1)$$

In which:

$A_{\text{exp}}$ : specimen exposure area (cm<sup>2</sup>);

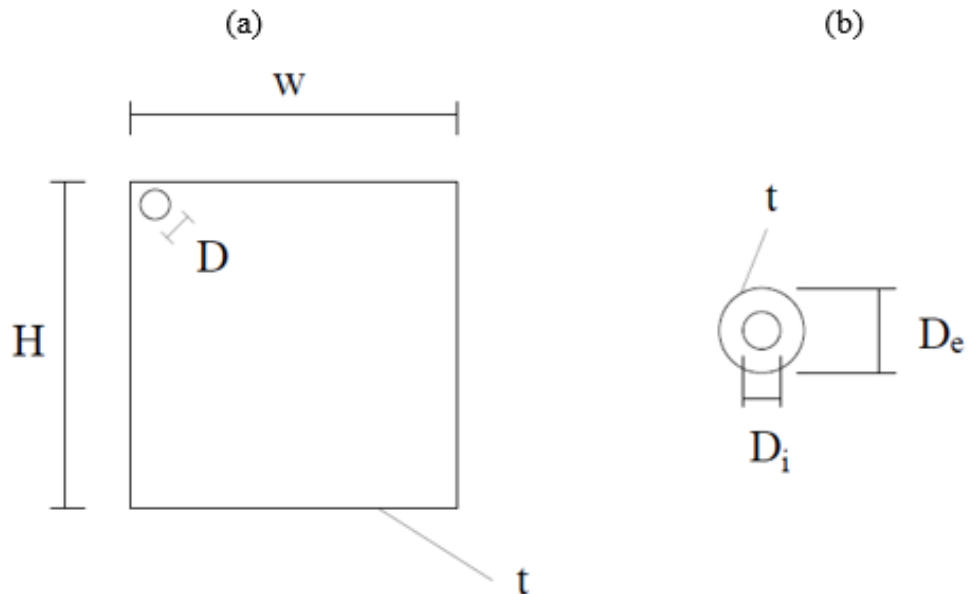
W: specimen width (cm);

H: specimen height (cm);

t: specimen thickness (cm); and

D: hole diameter (cm).

Figure 1 – Sketch of the galvanized steel specimens (a) and sacrificial anodes (b).



Source: The author (2023).

Table 1 - Dimensional characterization and mass of the galvanized steel specimens.

Specimen size (mm)	W (mm)	H (mm)	t (mm)	D (mm)	Exposure area (cm <sup>2</sup> )	Weight (g)
100 x 100 – SP100	100.76 ± 0.33	100.79 ± 0.33	3.88 ± 0.04	10.09 ± 0.65	215.91 ± 1.30	299.52 ± 3.41
125 x 125 – SP125	125.19 ± 1.73	125.80 ± 0.17	3.92 ± 0.04	10.21 ± 0.55	331.71 ± 4.72	468.59 ± 10.98
150 x 150 – SP150	150.85 ± 0.16	150,80 ± 0.27	3.95 ± 0.08	10.14 ± 0.44	475.92 ± 1.19	675.21 ± 6.43

W: width; H: height; t: thickness; D: hole diameter.

Source: The author (2023).

The galvanized steel specimens were cleaned to remove possible impurities on their surfaces before the experimental procedures. The steel was sanded with 600 grit sandpaper, rinsed with distilled water, degreased with acetone, rinsed once more with distilled water, and dried on paper towels. This procedure was adapted from Owoye et al. (2020) and Wu et al. (2010).

The Al anodes were produced with MIL-A-24779(SH) alloy. The exposure areas ranged between 8.73 and 10.96 cm<sup>2</sup>, calculated according to Equation 2. Table 2 presents their dimensions, average masses, the combination between anodes and specimens, and their cathode/anode area ratios.

$$A_{\text{anode}} = \frac{\pi}{2} \times (D_e - D_i)^2 + (\pi \times D_e \times t) + (\pi \times D_i \times t) \quad (2)$$

In which:

$A_{\text{anode}}$ : anode exposure area (cm<sup>2</sup>);

$D_e$ : anode external diameter (cm);

$D_i$ : anode internal diameter (cm); and

t: anode thickness (cm).

Table 2 - Dimensional characterization and mass of Al anodes and their respective cathode/anode area ratios.

Anode-SP combination	$D_e$ (mm)	$D_i$ (mm)	t (mm)	Exposure area (cm <sup>2</sup> )	Weight (g)	Cathode/anode area ratio
Al-SP100	20.83 ± 0.10	6.33 ± 0.06	6.36 ± 0.07	8.73 ± 0.12	5.23 ± 0.13	25:1
Al-SP125	23.86 ± 0.10	6.35 ± 0.04	6.48 ± 0.15	10.96 ± 0.07	7.03 ± 0.04	30:1
Al-SP150	23.82 ± 0.08	6.34 ± 0.05	6.42 ± 0.11	10.89 ± 0.07	7.08 ± 0.05	44:1

$D_e$ : external diameter;  $D_i$ : internal diameter; t: thickness.

Source: The author (2023).

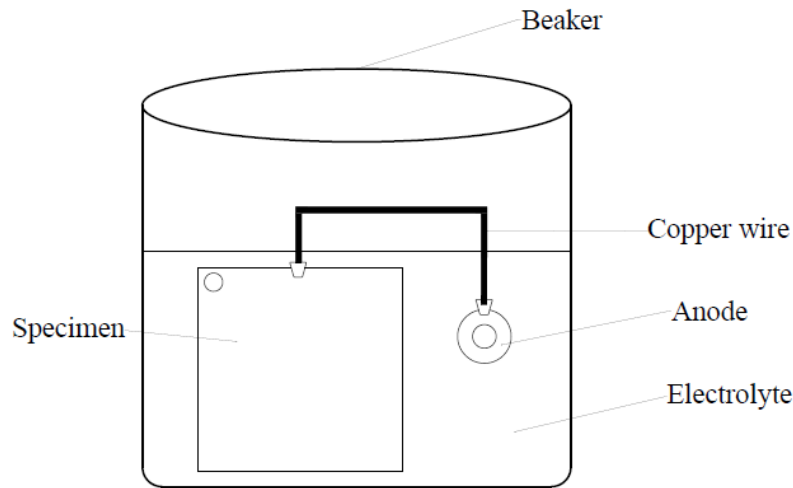
## 2.2 Immersion tests

Corrosion on galvanized steel specimens and Al anodes exposed to KCl solution was calculated using the mass loss method. Immersion tests were performed simulating 35 h of annual fertigation with white KCl at a concentration of 10 g L<sup>-1</sup> for ten years, totaling 350 h of exposure to the corrosive solution. Nine cathodic protection systems were prepared by connecting the galvanized steel specimens to the Al anodes, with three replicates for each cathode/anode area ratio. The connection was made with 1.5 mm<sup>2</sup> copper wire and chrome-plated steel claws. The unprotected treatments consisted of nine systems, with three replicates for each specimen size.

All systems were inserted into glass beakers, immersed in KCl solution at 10 g L<sup>-1</sup>, and diluted in distilled water using enough solution to cover the specimens (Figure 2). Distilled water was used to evaluate only the corrosive effect of the fertilizer since a wide variety of types of water can be used in irrigation systems depending on the region and source type. Combining this water's characteristics with the fertilizer can completely change the corrosion behavior and intensity.

The solutions were renewed periodically throughout the simulation every two cycles of 35 h to simulate a real situation of central pivot piping with the frequent renewal of the solution. All experimental procedures were performed with an artificially controlled temperature of 25 °C.

Figure 2 - Diagram of the experimental apparatus.



Source: The author (2023).

The galvanized steel specimens and Al anodes were removed from the solutions each 35 h cycle, undergoing a cleaning procedure to remove the corrosion products from the surface and prevent interference in the specimen weighing. The specimens and anodes were then rinsed with distilled water, degreased with acetone, dried on paper towels, and weighed on scales with a resolution of 0.01 and 0.0001 g, respectively.

The mass loss per area of the specimens and anodes was calculated using Equation 3.

$$ML = \frac{m_i - m_f}{A} \quad (3)$$

In which:

ML: mass loss ( $\text{mg cm}^{-2}$ );

$m_i$ : initial mass before the immersion tests (mg);

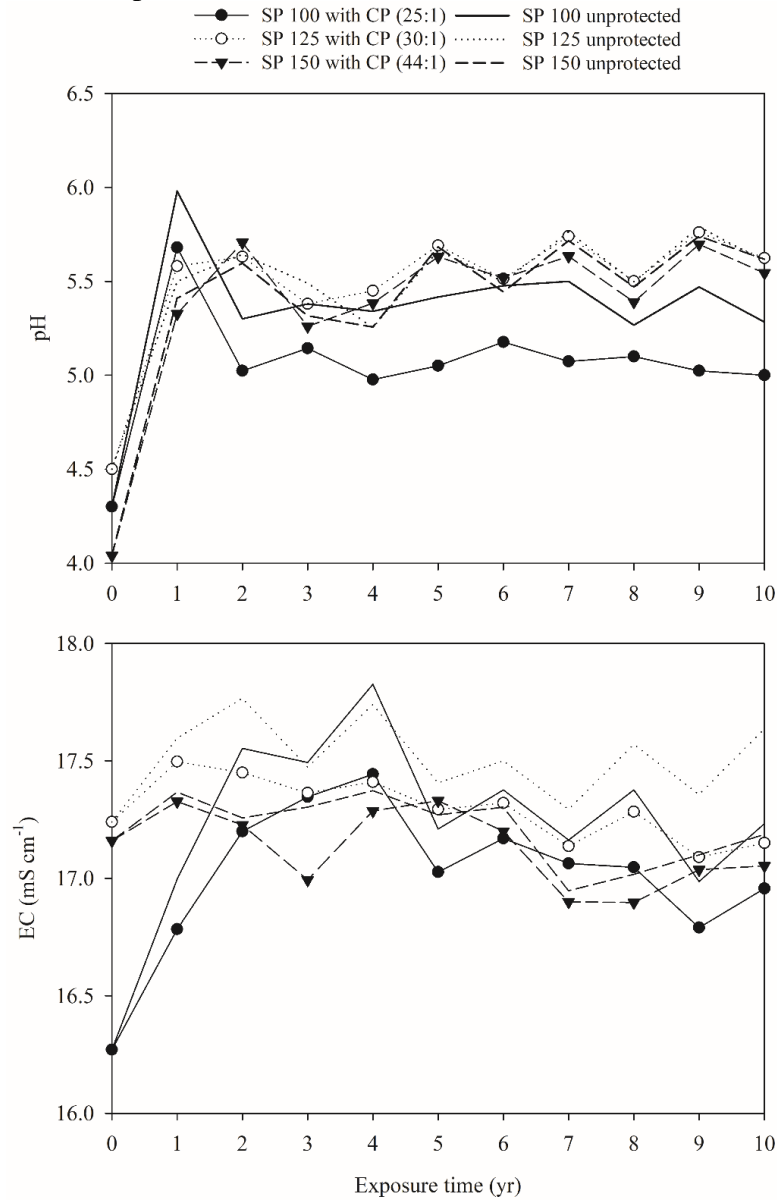
$m_f$ : final mass after sample cleaning (mg); and

A: exposure area ( $\text{cm}^2$ ).

### 2.3 pH and EC monitoring

The pH and EC of the solutions were monitored during the immersion tests. Figure 3 presents the results of these measurements. The average pH of the initial solutions were  $4.6 \pm 0.2$ ,  $4.4 \pm 0.1$ , and  $4.3 \pm 0.2$ , and the average ECs were  $16.86 \pm 0.35$ ,  $17.05 \pm 0.16$ , and  $16.92 \pm 0.15 \text{ mS cm}^{-1}$ , for SP100, SP125, and SP150, respectively.

Figure 3 - Variation of pH (a) and EC (b) of KCl solutions at  $10 \text{ g L}^{-1}$  during the ten years of exposure of the galvanized steel specimens with cathodic protection and aluminum anodes without protection.



Source: The author (2023).

## 2.4 Statistical analysis

A completely randomized design (CRD) with a  $2 \times 3 \times 10$  factorial scheme and three replicates for each cathode-anode set was used to analyze specimen mass loss. The sources of variation were protection (presence and absence), cathode/anode area ratio [25:1, 30:1, and 44:1 (SP 100, 125, and 150)], and exposure time (1 to 10 years). The analysis of variance (ANOVA) was evaluated using the F-test. In case of significant variation source, the means were compared

by the Scott-Knott Test at 5% probability for qualitative variables or regression analysis for quantitative variables.

A CRD was also established in a 3 x 10 factorial scheme for three proportions of the area between cathode and anode (25:1, 30:1, and 44:1) and exposure time, also from one to ten years, for the ANOVA of the anode mass consumption. The means were compared as described in the previous experiment. All analyzes were performed using the Sisvar 5.6 statistical software (FERREIRA, 2019).

## 4 RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Mass loss of galvanized steel

Table 3 presents the ANOVA of the mass loss per area of the galvanized steel specimens, with and without cathodic protection using Al anodes, for different cathode/anode area ratios and exposure times in KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$ . It was possible to verify that the cathodic protection, area ratio, exposure time, and interaction between the variation sources caused significant effects on the mass loss of galvanized steel.

Table 3 - ANOVA summary of the mass loss by area of galvanized steel specimens with and without cathodic protection with Al anodes, different cathode/anode area ratios, and exposure time in KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$ .

Source of variation	DF	Mean square and F significance
Protection (P)	1	3.96*
Area Ratio (AR)	2	1.89*
Exposure Time (ET)	9	0.19*
P x AR	2	0.21*
P x ET	9	0.09*
AR x ET	18	0.06*
P x AR x ET	18	0.04*
Residual	120	0.01
Total	179	-
Overall mean		0.13
Coefficient of variation		90.60%

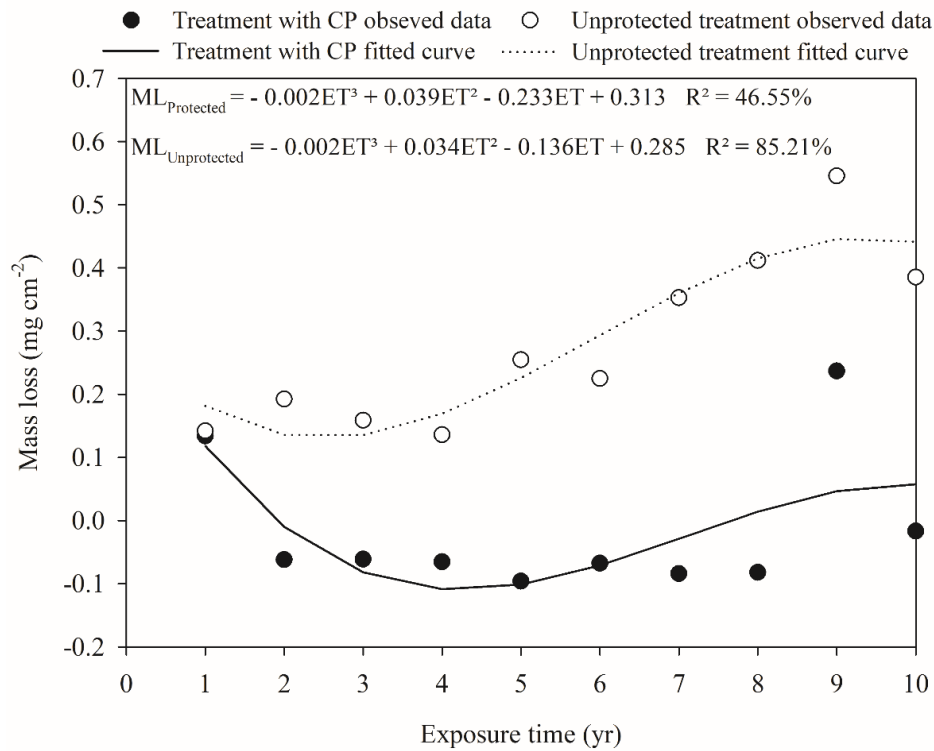
DF: degrees of freedom; \*: significant by the F-test at a 5% probability.

Source: The author (2023).

Figure 4 shows the general behavior of the mass loss of galvanized steel. It presents the means of mass loss for the three cathode/anode area ratios in contact with the KCl solution, demonstrating the effect of cathodic protection on the mass loss of galvanized steel for the simulated situation.



Figure 4 - Comparison of the mass loss behavior of galvanized steel specimens in contact with KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$  with cathodic protection using Al anode and without protection.



Source: The author (2023).

The mass loss of the specimens is practically zero when Al sacrificial anodes are used and even negative for some exposure times, which means a mass gain of the specimens. This indicates that the loss of metallic material generated by corrosion was not enough to overcome the small mass gain caused by the deposition of corrosion products not fully solubilized in solution and partially absorbed by the metallic surface of the sample. On the other hand, a progressively greater mass losses were obtained over the exposure time for the specimens without protection.

Loto, Loto, and Popoola (2019) also observed decreased cathode mass loss using cathodic protection for carbon steel, while Dong et al. (2010) observed this for stainless steel in a static fluid condition. These authors also identified a progressive mass loss over exposure time.

Table 4 shows the mass loss of galvanized steel specimens for each cathode/anode area ratio and exposure time in the KCl solution. There was no statistically significant difference between the mass losses for the different cathode/anode area ratios in most of the simulation time and, even when significant, the loss results were close to zero. This behavior was also

observed by Dong et al. (2010), who found no significant difference in cathode mass loss for different cathode/anode area ratios.

Table 4 - Mass loss ( $\text{mg cm}^{-2}$ ) of the galvanized steel specimens for each cathode/anode area ratio and exposure time in the KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$ .

Exposure time (yr)	Cathode/anode area ratio		
	25:1	30:1	44:1
1	0.57 a	-0.08 b	-0.09 b
2	0.02 a	-0.02 a	-0.18 a
3	-0.02 a	-0.05 a	-0.12 a
4	0.12 a	-0.11 b	-0.21 b
5	-0.02 a	-0.14 a	-0.13 a
6	0.12 a	-0.11 b	-0.22 b
7	-0.14 a	-0.03 a	-0.08 a
8	-0.11 a	-0.02 a	-0.12 a
9	0.70 a	0.07 b	-0.06 b
10	-0.02 a	0.02 a	-0.06 a
Average	0.12	-0.05	-0.13

Values followed by the same lowercase letter in the rows do not differ significantly by the Scott–Knott test at 5% probability.

Source: The author (2023).

The variation in mass loss can be attributed to the beginning and end stages of corrosion in certain locations of the specimens since corrosion may have ceased in some areas while beginning in others (SONG et al., 2004). Still, corrosion tends to decrease with increasing exposure time to the same solution due to the formation of a protective film on the metal surface, which protects it against corrosion (NWOYE et al., 2014). This film can deteriorate and cause increased mass loss with the exchange of solutions and surface cleaning.

Table 4 also shows that the average mass loss was higher for the SP100 (25:1) specimen, followed by SP125 (30:1) and SP150 (44:1), i.e., the highest corrosion protection occurred for the highest cathode/anode area ratio (anode with the smallest area). Despite a numerically considerable difference between the losses, the values are small for uniform corrosion, equivalent to an average corrosion rate between  $0.006$  and  $0.022 \text{ mm yr}^{-1}$ , corresponding to low corrosivity, according to the NACE Standard SP-07-75 (NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS - NACE, 2013).

This result corroborates with Dong et al. (2011), who found that the corrosion rate of stainless steel connected with carbon steel anodes decreased with the increase in the cathode/anode area ratio. The opposite to that found by Loto and Popoola (2011), using Zn

anodes as protection for carbon steel in seawater, and Loto, Loto, and Popoola (2019) using the same galvanic pair in HCl solution in which greater corrosion protection was found for the anode with a larger area.

The area of the specimen may have influenced the mass loss of the specimens in the simulation presented in this study since the exposure time and solution were the same. Corrosion was more pronounced for the smaller specimen because the exposure area to be taken by corrosion was smaller for the same simulation time. Such behavior was observed by Kim et al. (2013), in which the corrosion rate of Mg decreased with the exposure time in the same solution and with the increase in the surface area of the specimens.

### 3.2 Mass consumption of the galvanic anode

Table 5 presents the analysis of variance (ANOVA) for the mass loss per area of the Al anodes for different cathode/anode area ratios in contact with KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$ . The different area ratios, exposure times, and the interaction between these two sources of variation caused significant effects on the mass loss of Al anodes.

Table 5 - ANOVA summary of the mass loss by area of Al anodes in contact with KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$  used as cathodic protection for different cathode/anode area ratios and exposure times.

Source of variation	DF	Mean square and F significance
Area Ratio (AR)	2	134.72*
Exposure Time (ET)	9	823.50*
AR x ET	18	5.87*
Residual	60	1.04
Total	89	-
Overall mean		19.53
Coefficient of variation		5.21%

DF: degrees of freedom; \*: significant by the F-test at a 5% probability.

Source: The author (2023).

Table 6 shows the mass loss per area of the Al anodes for different cathode/anode area ratios. Thus, it is possible to determine the consumption of the anodes for each proportion. The mass loss of the anodes connected to specimens SP100 (25:1) and SP150 (44:1) was statistically equal, while the loss was lower for the anodes connected to specimen SP125 (30:1).

Table 6 - Mass loss ( $\text{mg cm}^{-2}$ ) of Al anodes used as cathodic protection of galvanized steel specimens in contact with KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$  for different cathode/anode area ratios.

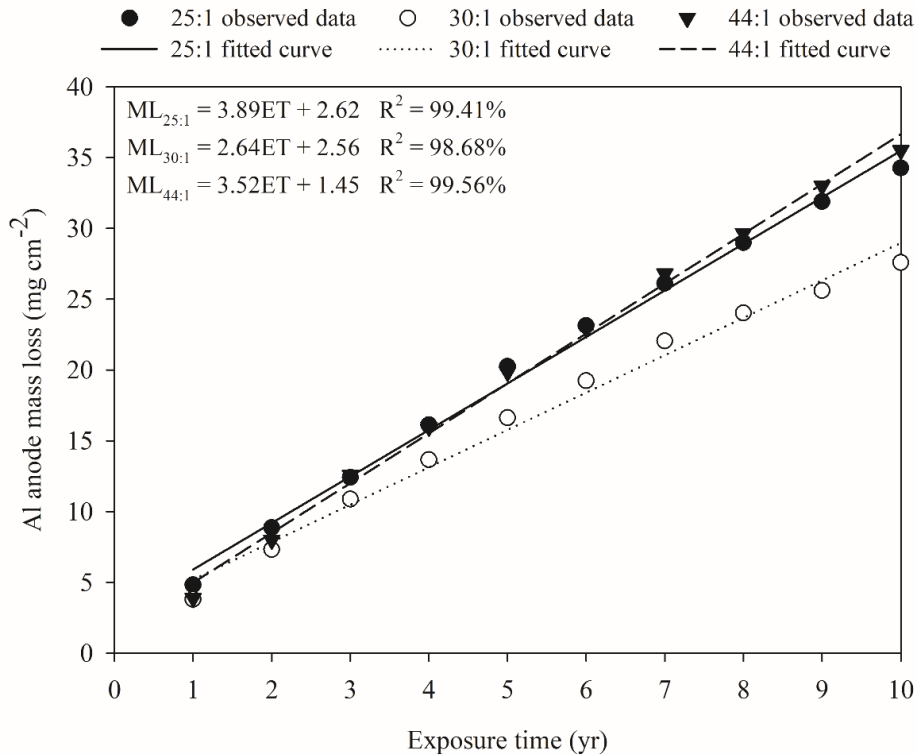
Cathode/anode area ratio	Anode mass loss ( $\text{mg cm}^{-2}$ )
25:1	20.69 a
30:1	17.08 b
44:1	20.81 a

Values followed by the same lowercase letter in the column do not differ significantly by the Scott-Knott test at 5% probability.

Source: The author (2023).

Figure 5 shows the mass loss per area of the Al anodes for different cathode/anode area ratios over the exposure time in the KCl solution. These behaviors reflect the durability of the anode in the simulated condition. It is possible to note that the mass loss of the Al anode, that is, its consumption, is linear and increases with the exposure time to the KCl solution. The same behavior was observed by Nezgoda, Goudar and Brasil (2016) for Al anodes; Yaro, Hameed and Khadom (2013) for Zn anodes in contact with seawater; and by Dong et al. (2010) for carbon steel anodes in contact with HCl.

Figure 5 - Mass loss behavior over the exposure time of Al anodes used as cathodic protection of galvanized steel specimens in contact with KCl solution at  $10 \text{ g L}^{-1}$  for different cathode/anode area ratios.



Source: The author (2023).

Nezgoda, Goudar and Brasil (2016) and Prayitno and Irsyad (2018) found that the higher the cathode/anode area ratio, the greater the mass loss of the anode for the same exposure time when testing Al anodes as protection for carbon steel in solutions of sodium chloride and natural seawater. Dong et al. (2010) also observed that the mass loss of the carbon steel anode used to protect stainless steel in sodium chloride solution increased with the rise in the cathode/anode area ratio, indicating that corrosion in the anode accelerates when there is a larger cathode proportional to the anode. However, the difference in the mass loss for different proportions was relatively low for static fluid.

The larger the cathode area relative to the anode, the higher the corrosion rate at the anode, but the galvanic corrosion current is more dependent on the diffusion rate of dissolved oxygen under static fluid conditions, i.e., the rate at which oxygen can be reduced at the cathode. Thus, corrosion is independent of the size of the anode and becomes proportional to the area of the cathode and the anode corrosion is constant for a given cathode area (FRANCIS; TURNBULL; HINDS, 2020; STANDISH et al., 2019).

Additionally, the degree of influence of the cathode/anode area ratio depends on the galvanic pair. Song et al. (2004) observed that the increase of corrosion in the anode with the

rise of the cathode/anode area ratio was expressive for the galvanic pair steel-Mg and slight for the pair Al-Mg. This behavior may be due to the lower potential difference between Al and Mg compared to the steel-Mg pair. The corrosive process tends to be slower when the metals constituting the galvanic pair have little potential difference (BILGIC, 2018; GENTIL, 2022).

Therefore, there was no significant difference in the mass loss of the anode with the increase in the cathode/anode area ratio for this simulation since the consumption of the anodes was the same for the largest and smallest proportions. As potential difference between Zn and Al is small, a slight potential difference between the galvanic pair controlled the process since galvanized steel has a Zn coating. Also, the simulation performed in this work was performed under static fluid conditions, which may interfere with the speed of anode consumption. According to studies by Dong et al. (2010) and Yaro, Hameed and Khadom (2013), the consumption of sacrificial anodes may increase with the rise of fluid temperature and flow and decreasing solution pH.

Based on the result of this study, we recommend a 30:1 ratio, with a decrease of 18% in the mass loss for the same simulated exposure time, which would lead to a longer duration of the anode and longer protection time for galvanized steel, although it may be more economically feasible to use the higher ratio (44:1) considering the slight potential difference between Al and galvanized steel, resulting in a slower anode corrosion, and the mass loss difference among the three simulated cathode/anode area ratios, as a smaller number of anodes along the pipeline would be required.

As a comparison, about 80 anodes per tube would be necessary if this were the cathode/anode area ratio used, if the same anodes of this simulation were applied (an area equal to 10.9 cm<sup>2</sup>) in a real situation of a central pivot operation, considering a tube with a diameter of 167 mm (6 5/8 inches) and length of 6.7 m, by a simple comparison of area ratio. Therefore, 40 anodes would be necessary if they were twice the size, and so on.

Using sacrificial anodes in central pivot pipelines is still uncommon, as previously presented in this work. These materials could be applied to connect the emitter with the lateral line, allowing the integration with an anode in the form of a billet or screw, thus enabling the exchange or replacement with ease.

However, other variables must be studied and considered to design the anodes, such as the electric current required for cathodic protection, the electrical resistivity of the electrolyte, electric current density, anode current capacity, and total circuit resistance (GENTIL, 2022). These electrochemical evaluations enable a precise recommendation of the number of anodes and their size and spacing to achieve the best cost-effective corrosion protection.

## 5 CONCLUSION

The Al sacrificial anodes use significantly decreases the mass loss of galvanized steel exposed to fertigation solutions with KCl. Additionally, the increase in the cathode/anode area ratio presented no significant difference in the mass loss of galvanized steel, but the mass loss was higher for the lower cathode/anode area ratio and lower for the higher area ratio.

The difference in the mass loss of the Al anodes was irrelevant with the increase in the cathode/anode area ratio, being equal for higher and lower proportions due to the slight potential difference between the galvanized steel coating (composed of Zn) and the anode material. Therefore, using the larger ratio is more economically feasible (44:1).

## REFERENCES

- AMER, B. A. et al. Galvanic corrosion of steel in agitated vessels used in fertilizer industry. **Theoretical Foundations of Chemical Engineering**, v. 53, n. 2, p. 280-291, 2019. Disponível em: doi:10.1134/S0040579519020015. Acesso em: 01 out. 2022.
- ATSHAN, A. A.; HASAN, B. O.; ALI, M. H. Effect of anode type and position on the cathodic protection of carbon steel in sea water. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 3, n. 5, p. 2017-2024, 2013. Disponível em: <http://inpressco.com/category/ijcet>. Acesso em: 12 out. 2022.
- BILGIC, S. Galvanic corrosion. **The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)**, v. 4, p. 259-262, 2018. Disponível em: <http://www.epstem.net/en/pub/issue/40805/498142>. Acesso em: 12 out. 2022.
- CORRÊA, F. V. et al. Corrosion caused by fertigation with urea and potassium chloride solutions resembles that generated by irrigation. **Irrigation and Drainage**, v. 72, p. 1-12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ird.2819>. Acesso em: 14 mar. 2023.
- DELAUNOIS, F. F.; VITRY, T. V. Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems. **Bioelectrochemistry**, v. 97, p. 110-119, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.01.003>. Acesso em: 15 jan. 2022.
- DONG, C. F. et al. Erosion accelerated corrosion of a carbon steel–stainless steel galvanic couple in a chloride solution. **Wear**, v. 270, p. 39-45, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.09.004>. Acesso em: 01 out. 2022.
- DONG, C. F. et al. Galvanic corrosion of a carbon steel-stainless steel couple in sulfide solutions. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 20, n. 9, p. 1631-1637, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9839-x>. Acesso em: 01 out. 2022.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>. Acesso em: 01 mar. 2022.
- FRANCIS, R.; TURNBULL, A.; HINDS, G. **Bimetallic Corrosion, Guides for Good Practice in Corrosion Control, No. 5**. United Kingdom: National Physical Laboratory – NPL, 2020. Disponível em: <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/8617>. Acesso em: 01 out. 2022.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.
- GURRAPPA, I. Cathodic protection of cooling water systems and selection of appropriate materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, p. 256–267, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.074>. Acesso em: 15 jan. 2022.
- JAFAR, S. A. The Influence of Area Ratio, Temperature and Rotational Speed on Galvanic corrosion between Low Alloy Steel–Copper couple in 4%NaCl Solution. **Engineering and Technology Journal**, v. 35, n. 6, p. 617-623, 2017. Disponível em: <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=131979>. Acesso em: 05 out. 2022.



KIM, W. et al. Effect of surface area on corrosion properties of magnesium for biomaterials. **Metals and Materials International**, v. 19, n. 5, p. 1131-1137, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12540-013-5032-0>. Acesso em: 05 out. 2022.

LARUE, J. A review of center pivot pipeline solutions for various water qualities. *In: ASABE Annual International Meeting*, Paper Number: 072286, Minneapolis, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.23382>. Acesso em: 15 jan. 2022.

LARUE, J. How can fertigation and chemigation with a center pivot improve sustainability of irrigation corn? *In: ASABE Annual International Meeting*, Paper Number: 2200208, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/aim.202200208>. Acesso em: 16 fev. 2023.

LI, M. et al. Effects of application methods and urea rates on ammonia volatilization, yields and fine root biomass of alfalfa. **Field Crops Research**, v. 218, p. 115-125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.011>. Acesso em: 16 fev. 2023.

LOTO, C. A.; LOTO, R. T.; POPOOLA, A. P. Performance evaluation of zinc anodes for cathodic protection of mild steel corrosion in HCl. **Chemical Data Collections**, v. 24, 100280, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2019.100280>. Acesso em: 15 jan. 2022.

LOTO, C. A.; POPOOLA, A. P. I. Effect of anode and size variations on the cathodic protection of mild steel in sea water and sulphuric acid. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 6, n. 12, p. 2861-2868, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJBM11.537>. Acesso em: 15 jan. 2022.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE SP 07-75**: Preparation, installation, analyses, and interpretation of corrosion in oilfield operation. Houston, 2013.

NEZGODA, J.; GOUDAR, J. V.; BRASIL, S. L. D. C. Estudo das camadas calco-magnesianas formadas em superfícies metálicas sob proteção catódica. *In: INTERCORR 2016*, 2016, Búzios. **Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO)**. Disponível em: [https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2016/INTERCORR2016\\_300.pdf](https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2016/INTERCORR2016_300.pdf). Acesso em: 10 out. 2022.

NWOYE, C. I. et al. Operational dependence of galvanized steel corrosion rate on its structural weight loss and immersion-point pH in sea water environment. **American Journal of Mining and Metallurgy**, v. 2, n. 4, p. 81-87, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.12691/ajmm-2-4-4>. Acesso em: 15 jan. 2022.

OWOEYE, F. T. et al. Cathodic Protection of Aluzinc coated, Galvanized and Stainless Steels in Ijegan Seawater using Aluminium as Sacrificial Anode. **United International Journal for Research & Technology**, v. 2, n. 2, p. 81-92, 2020. Disponível em: <https://uijrt.com/articles/v2/i2/UIJRTV2I20014.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2022.

PRAYITNO, D.; IRSYAD, M. Effect of ratio of surface area on the corrosion rate. **SINERGI**, v. 22, n. 1, p. 7-12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22441/sinergi.2018.1.002>. Acesso em: 01 out. 2022.

PRYOR, M. J.; KEIR, D. S. Galvanic Corrosion: II. Effect of pH and Dissolved Oxygen Concentration on the Aluminum-Steel Couple. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 105, n. 11, p. 629-635, 1958. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2428681>. Acesso em: 01 out. 2022.

RODRIGUES, K. V.; LIMA, L. A.; THEBALDI, M. S. Effects of fertigation on corrosion in galvanized steel used in center pivot systems. **Water Supply**, v. 20, n. 4, p. 1189–1194, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2020.029>. Acesso em: 10 out. 2022.

SONG, G. et al. Galvanic corrosion of magnesium alloy AZ91D in contact with an aluminium alloy, steel and zinc. **Corrosion Science**, v. 46, p. 955-977, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00190-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00190-2). Acesso em: 05 out. 2022.

STANDISH, T. E. et al. Influence of area ratio and chloride concentration on the galvanic coupling of copper and carbon steel. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 166, n. 11, p. C3448-C3455, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0521911jes>. Acesso em: 13 fev. 2023.

TSUJINO, B.; MIYASE, S. On area ratio of anode to cathode for iron in neutral solution. **Corrosion**, v. 37, n. 9, p. 540-545, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.5006/1.3580803>. Acesso em: 05 out. 2022.

WU, Y. H. et al. Corrosion characteristics of Q235 steel in simulated Yingtan soil solutions. **Mat.-wiss. u.Werkstofftech.**, v. 41, n. 3, p. 142-146, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/mawe.201000559>. Acesso em: 05 ago. 2022.

XI, Y. et al. Evaluating the performance of aluminum sacrificial anodes with different concentration of gallium in artificial sea water. **Coatings**, v. 12, n. 53, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings12010053>. Acesso em: 13 fev. 2023.

YARO, A. S.; HAMEED, K. W.; KHADOM, A. A. Study for prevention of steel corrosion by sacrificial anode cathodic protection. **Theoretical Foundations of Chemical Engineering**, v. 47, n. 3, p. 266-273, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1134/S0040579513030147>. Acesso em: 01 out. 2022.

ZHAO, W. et al. Effects of fertigation splits through center pivot on the nitrogen uptake, yield, and nitrogen use efficiency of winter wheat grown in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 240, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106291>. Acesso em: 16 fev. 2023.