



FLÁVIA VILELA CORRÊA

**CORROSÃO EM FERTIRRIGAÇÃO POR SOLUÇÕES DE
UREIA E CLORETO DE POTÁSSIO EM AÇO
GALVANIZADO E AÇO INOXIDÁVEL 304**

**LAVRAS-MG
2021**

FLÁVIA VILELA CORRÊA

**CORROSÃO EM FERTIRRIGAÇÃO POR SOLUÇÕES DE UREIA E CLORETO DE
POTÁSSIO EM AÇO GALVANIZADO E AÇO INOXIDÁVEL 304**

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

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

**LAVRAS-MG
2021**

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

Corrêa, Flávia Vilela.

Corrosão em fertirrigação por soluções de Ureia e Cloreto de Potássio em aço galvanizado e aço inoxidável 304 / Flávia Vilela Corrêa. - 2021.

59 p. : il.

Orientador(a): Luiz Antonio Lima.

Coorientador(a): Michael Silveira Thebaldi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Teste de corrosão por imersão. 2. Irrigação. 3. Taxa de corrosão. I. Lima, Luiz Antonio. II. Thebaldi, Michael Silveira. III. Título.

FLÁVIA VILELA CORRÊA

CORROSÃO EM FERTIRRIGAÇÃO POR SOLUÇÕES DE UREIA E CLORETO DE POTÁSSIO EM AÇO GALVANIZADO E AÇO INOXIDÁVEL 304

CORROSION IN FERTIRRIGATION BY UREA AND POTASSIUM CHLORIDE SOLUTIONS IN GALVANIZED STEEL AND STAINLESS STEEL 304

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

APROVADA em 26 de março de 2021.

Dr. Luiz Antonio Lima

UFLA

Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira

UFLA

Dr. Carlos Henrique Lauro

UFSJ

Prof. Dr. Luiz Antonio Lima

Orientador

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi

Coorientador

LAVRAS-MG

2021

*Aos meus amados pais, Gislane e Rogério.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Gislane e Rogério, por todo amor, carinho, dedicação e apoio que me dão desde o meu nascimento. Sou muito grata por estarem sempre presentes e por toda dedicação!

Ao meu namorado, Lucas ou Lutinha, como preferir, por todo amor, cumplicidade, companheirismo e disposição para madrugar comigo no laboratório.

Aos professores Luiz Antonio Lima e Michael Silveira Thebaldi pela orientação, paciência e disposição para ajudar, inclusive nos finais de semana!

Aos professores Luiz Fernando Coutinho de Oliveira e Carlos Henrique Lauro pela disponibilidade e contribuições na banca de defesa, principalmente ao professor e amigo Coutinho, que me acompanha e orienta desde a graduação.

Aos colegas e funcionários do programa de pós-graduação em Recursos Hídricos, em especial Karina Vilela Rodrigues e Elvis Marcio de Castro Lima que se mostraram presentes e atenciosos sempre que necessário.

Ao Pitôco, meu “cãopanheiro” de longa data, mais precisamente, 16 anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Muito obrigada a todos! Tenho certeza de que sem vocês, tudo teria sido mais difícil!

RESUMO

A fertirrigação é uma técnica agrícola que consiste em aplicar fertilizantes via água de irrigação. Quando comparada ao método de fertilização convencional, apresenta vantagens como a economia de tempo e mão de obra. Entretanto, ao se diluir o fertilizante na água de irrigação é possível que a corrosão dos componentes metálicos do sistema seja acentuada. Nesse estudo, foi avaliado os efeitos da corrosão devido à prática da fertirrigação com soluções de Cloreto de Potássio branco (10 g L⁻¹) e Ureia (10 g L⁻¹) em corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304, materiais semelhantes aos utilizados em pivôs centrais e em bombas injetoras, ao simular a prática de 5 fertirrigações anuais, com duração de 7 horas cada, por um período de 10 anos. O experimento se deu por meio de testes de corrosão por imersão e foram calculadas a perda de massa, a taxa de penetração da corrosão e a estimativa da vida útil dos materiais. Os resultados permitiram perceber que a variação da fonte de fertilizante bem como o tipo de metal, influenciam nos efeitos da corrosão, no entanto, a vida útil estimada para os componentes metálicos utilizados em sistemas de irrigação que praticam ou não fertirrigação, foi praticamente a mesma.

Palavras-chave: Taxa de Corrosão. Perda de Massa. Teste de Corrosão por Imersão. Pivô Central. Bomba Injetora.

ABSTRACT

Fertigation is an agricultural technique that consists on applying fertilizers through irrigation water. When compared to conventional fertilization method, it presents advantages such as saving time and labor. However, when diluting the fertilizer in irrigation water, it is possible that corrosion of the metallic components of the system is accentuated. In this study, the corrosion effects due to practice of fertigation with white Potassium Chloride (10 g L⁻¹) and Urea (10 g L⁻¹) solutions in galvanized steel and AISI 304 stainless steel specimens were evaluated, materials similar to those used in center pivots and injection pumps, when simulating the practice of 5 annual fertigation, lasting 7 hours each, for a period of 10 years. The experiment was carried out by means of immersion corrosion tests and the mass loss, the corrosion penetration rate and the estimated of the material useful life were calculated. The results allowed to verify that variation in fertilizer source as well as the type of metal, influence corrosion effects, however, the estimated useful life for the metallic components used in irrigation systems that practice or not fertigation, was practically the same

Keywords: Corrosion Rate. Mass Loss. Corrosion Immersion Test. Center Pivot. Injection pumps.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1	Objetivo geral.....	3
2.2	Objetivos específicos	3
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	4
3.1	Fertilizantes	4
3.1.1	Ureia.....	5
3.1.2	Cloreto de Potássio.....	5
3.2	Sistemas de irrigação por aspersão via pivô central.....	6
3.3	Materiais metálicos utilizados em pivôs centrais e em bombas injetoras	8
3.4	Fertirrigação.....	9
3.5	Corrosão	10
3.5.1	Conceitos e mecanismos básicos da corrosão	10
3.5.2	Corrosão em aço galvanizado e aço inoxidável.....	14
3.5.3	Corrosão dos sistemas de irrigação	15
4.	MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1	Teste de corrosão por imersão e análise quantitativa dos corpos de prova	21
4.2	Análise qualitativa dos corpos de prova	24
4.2	Qualidade da água de abastecimento	24
4.4	Monitoramento da qualidade das soluções	25
4.5	Delineamento experimental e análise estatística.....	27
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1	Análise qualitativa	28
5.2	Análise Quantitativa.....	32
5.2.1	Perda de massa por área	32
5.2.2	Taxa de penetração da corrosão	37

5.2.3	Perda de espessura acumulada.....	41
5.	CONCLUSÕES	45
	REFÊRENCIAS.....	46
	APÊNDICE A – Corpos de prova de aço inox expostos à solução contendo água.	54
	APÊNDICE B – Corpos de prova de aço inox expostos à solução contendo Cloreto de Potássio branco e água, 10 g L ⁻¹	55
	APÊNDICE C – Corpos de prova de aço inox expostos à solução contendo Ureia e água, 10 g L ⁻¹	56
	APÊNDICE D – Corpos de prova de aço galvanizado expostos à solução contendo água.	57
	APÊNDICE E – Corpos de prova de aço galvanizado expostos à solução contendo Cloreto de Potássio e água, 10 g L ⁻¹	58
	APÊNDICE F - Corpos de prova de aço galvanizado expostos à solução contendo Ureia e água, 10 g L ⁻¹	59

1. INTRODUÇÃO

A irrigação abrange um conjunto de técnicas para atender a demanda hídrica de determinada cultura em momentos e em quantidades estratégicas, para que haja uma otimização da produção agrícola (FERNANDES, 2019; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009; OLIVEIRA et al., 2019). Dentre os benefícios que essa prática traz ao agricultor, destaca-se o aumento da qualidade dos produtos agrícolas, a diminuição dos riscos de produção, o aumento do número de safras ao ano e a possibilidade da quimigação.

Em síntese, a quimigação é uma técnica que consiste em transportar agroquímicos diluídos na água por meio do próprio sistema de irrigação. Caso esse agroquímico seja um fertilizante, a quimigação é denominada fertirrigação. A fertirrigação destaca-se em relação à fertilização convencional por possibilitar fracionar a aplicação dos fertilizantes de acordo com a época e com as necessidades da cultura, minimizar os custos referentes a maquinários e mão de obra e reduzir os riscos de contaminação ambiental e compactação do solo, uma vez que as perdas e os excessos de fertilizantes tendem a ser minimizados. Como desvantagem, tem-se que, ao aplicar fertilizantes junto à água, esses podem reagir e provir, em relação à água sem fertilizantes, um meio mais agressivo aos componentes metálicos dos equipamentos de irrigação, diminuindo a vida útil dos mesmos. Esse processo denominado corrosão é espontâneo e ocorre devido à reações químicas ou eletroquímicas entre o metal e o meio no qual este está inserido (COELHO et al., 2010; PERFEITO et al., 2017; SOUSA et al., 2011).

No Brasil, um dos sistemas de irrigação mais usuais é a aspersão via pivô-central. Presume-se que existam cerca de 20 mil pivôs em operação no país, o que de certo modo favorece a prática da fertirrigação, já que a mesma apresenta maior eficiência quando utilizada em sistemas de irrigação pressurizados, nos quais há um controle maior sobre a aplicação e distribuição de água (ANA, 2019; BOAS et al., 2006; ROCHA; CHRISTOFIDIS, 2015). Esses sistemas são majoritariamente constituídos por peças metálicas e, portanto, estão sujeitos à corrosão.

Em sistemas de irrigação em que há a presença de peças, acessórios e tubulações metálicas, a corrosão prejudica a eficiência do sistema como um todo, visto que problemas relacionados a vazamentos, à qualidade da água irrigada, à resistência e à durabilidade do sistema tornam-se frequentes. Esse fenômeno é tido como a principal causa de troca de peças e equipamentos de irrigação, gerando custos relativamente altos ao agricultor e transtornos quanto à produção agrícola (RODRIGUES et al., 2019).

Quando é rapidamente identificada e tratada, a corrosão pode ser controlada e seus

efeitos minimizados, mas em geral, é muitas vezes negligenciada. Ademais, existem poucas informações e estudos relacionados à corrosão na irrigação, o que gera incertezas e especulações quanto ao uso ou não da fertirrigação.

Sendo assim, esse trabalho visa disponibilizar informações sobre os efeitos da corrosão causada pela fertirrigação com solução de Ureia (10g L^{-1}) e Cloreto de Potássio branco (10g L^{-1}), em corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304, materiais semelhantes ao utilizado em sistema de irrigação via pivô central ou mesmo em bombas (aço inox), em um período de 10 anos de operação. A hipótese levantada é a de que as peças metálicas expostas à fertirrigação terão vida útil menor do que aquelas peças de mesmo material que foram expostas apenas à água de irrigação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar e comparar os possíveis efeitos da corrosão em corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304, materiais semelhantes aos utilizados em sistemas de irrigação via pivô central e equipamentos de injeção de fertilizantes, expostos a soluções de fertirrigação de Cloreto de Potássio branco (10 g L^{-1}), Ureia (10 g L^{-1}) e água, ao simular a prática de 5 fertirrigações por ano, cada uma com 7 horas de duração, por um período de 10 anos.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a perda de massa por área e a taxa de penetração da corrosão dos corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304, devido ao contato direto com soluções contendo Cloreto de Potássio branco ou Ureia, na concentração de 10 g L^{-1} ;
- Analisar a perda de massa por área e a taxa de penetração de corrosão dos corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304 devido ao contato direto com água;
- Identificar qual material estudado é mais resistente às soluções potencialmente corrosivas avaliadas;
- Avaliar os possíveis efeitos da fertirrigação sobre a vida útil do aço galvanizado e aço inox AISI 304 utilizados em sistemas de irrigação do tipo pivô central e bombas injetoras de fertilizantes.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Fertilizantes

A lei nº 12.890 de 10 de dezembro de 2013 define fertilizante como “substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes vegetais” (BRASIL, 2013). De maneira simplificada, têm-se que os fertilizantes incrementam o solo com nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, o que, segundo Reetz (2016), é o fator que viabiliza pelo menos metade da produção mundial de culturas vegetais.

A literatura lista 16 nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, sendo três não minerais e 13 minerais, que podem ser vistos na Tabela 1 (LOPES, 1998). Dentre os nutrientes minerais, existem aqueles dos quais as plantas necessitam em maior (nutrientes primários) e em menor quantidade (nutrientes secundários e micronutrientes), entretanto, vale salientar que apesar de alguns nutrientes serem exigidos em menor proporção pelas plantas, supri-los é essencial, visto que a produtividade é limitada pelo nutriente menos disponível (LIMA et al., 2017; LOPES, 1998).

Tabela 1 - Nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas.

Nutrientes não minerais	Nutrientes minerais primários	Nutrientes minerais secundários	Micronutrientes minerais	
Carbono (C)	Nitrogênio (N)	Cálcio (Ca)	Boro (B)	Manganês (Mn)
Oxigênio (O)	Potássio (P)	Magnésio (Mg)	Cloro (Cl)	Molibdênio (Mo)
Hidrogênio (H)	Fósforo (K)	Enxofre (S)	Cobre (Cu)	Zinco (Zn)
			Ferro (Fe)	

Fonte: Adaptado de Lopes (1998).

Existem, hoje, no mercado, diversas opções de fertilizantes que podem ser utilizados para suprir o déficit desses nutrientes e cabe ao agricultor optar por aquele que melhor atenda às necessidades da cultura e às características do solo e do método de adubação adotado (SILVA; FEITOSA FILHO, 2003). Na fertirrigação, deve-se optar por aqueles que apresentem alta solubilidade para que problemas relacionados com as obstruções do sistema sejam minimizados e para garantir a concentração da solução (ALEMAN; CHAVES, 2016; BORGES; SILVA, 2011; SILVA; FEITOSA FILHO, 2003).

3.1.1 Ureia

O Nitrogênio é um elemento que constitui os aminoácidos, as proteínas, os nucleotídeos, os ácidos nucleicos, a clorofila e as coenzimas das plantas (CUNHA, 2017; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2001; SILVA; FEITOSA FILHO, 2003). Dentre os fertilizantes nitrogenados existentes, destaca-se a Ureia, cuja fórmula química é $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (CECAGNO et al., 2019; OTTO et al., 2017; SILVA; FEITOSA FILHO, 2003) e estima-se que esse seja o fertilizante mais utilizado na agricultura (FRANCO; SARAIVA NETO, 2007; LOPES; BASTOS; DAHER, 2007; MOTA, 2017).

Por se tratar de um adubo altamente solúvel em água, a Ureia, quando aplicada via água de irrigação, não tende a obstruir os emissores e as tubulações do sistema, o que faz com que a mesma seja amplamente utilizada na fertirrigação (ALVES; KLAR, 1997; VITTI; BOARETTO; PENTEADO, 1993). Em seus estudos, Moraes et al. (2017) testaram diferentes fertilizantes via fertirrigação e constataram que a Ureia foi o composto que menos obstruiu os gotejadores. Semelhantemente, Cunha et al. (2019) confirmam a adequabilidade do fertilizante para a prática da fertirrigação.

3.1.2 Cloreto de Potássio

Outro elemento comumente utilizado na fertirrigação é o Potássio. Esse nutriente primário apresenta alta solubilidade na água, é o ativador de muitas enzimas e está intimamente envolvido na osmose, no balanço iônico e na abertura e fechamento de estômatos (CUNHA, 2017; RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2001). Plantas deficientes em Potássio tendem a crescer lentamente, terem o sistema radicular pouco desenvolvido e apresentarem folhas murchas ou queimadas (LOPES, 1998).

Dentre as fontes Potássicas existentes, destaca-se o Cloreto de Potássio (KCl) devido a seu baixo custo, alta solubilidade e eficiência (BORGES; SILVA, 2011; LOPES, 1998). Entretanto, o KCl Vermelho possui Ferro em sua composição, o que pode, além de causar efeitos de toxicidade quando em excesso, fazer com que as partes internas das peças dos sistemas de irrigação desenvolvam crostas caso o Ferro precipite, o que pode, inclusive, obstruir gotejadores. Sendo assim, para a fertirrigação é indicado que se utilize KCl branco, que não contém Ferro; entretanto, esse possui Alumínio que pode ser tóxico às plantas (BORGES; SILVA, 2011).

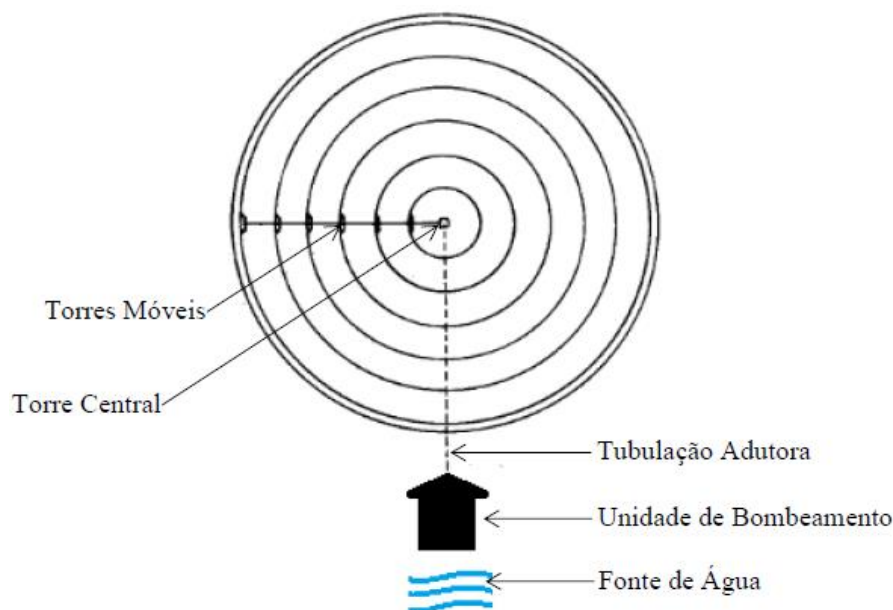
3.2 Sistemas de irrigação por aspersão via pivô central

Os métodos de irrigação podem ser classificados de acordo com a maneira pela qual a água é aplicada, sendo os principais métodos: a irrigação por superfície, subterrânea, por aspersão e localizada. A irrigação por aspersão consiste em simular uma chuva artificial por meio de emissores denominados aspersores, responsáveis pela aplicação da água na forma de jato, que devido à resistência aerodinâmica, se fragmenta em pequenas gotículas que caem sobre a superfície do solo e plantas (ANA, 2019).

No Brasil, é notável o crescente investimento nesse método de irrigação; e dentre os sistemas de aspersão, destaca-se o pivô central. Desenvolvido no Colorado (EUA) em 1948, essa tecnologia chegou em terras brasileiras em 1979 e, desde então, apresenta boa aceitação entre os agricultores, o que decorre de sua alta uniformidade de distribuição de água, alta adaptabilidade aos formatos e tamanhos de áreas, elevado grau de automação e capacidade de aplicação de agroquímicos (ANA, 2019).

Os sistemas de irrigação via pivô central são basicamente constituídos por uma unidade de bombeamento, tubulações adutoras, linha lateral, aspersores, torre central e torres móveis (FIGURA 1).

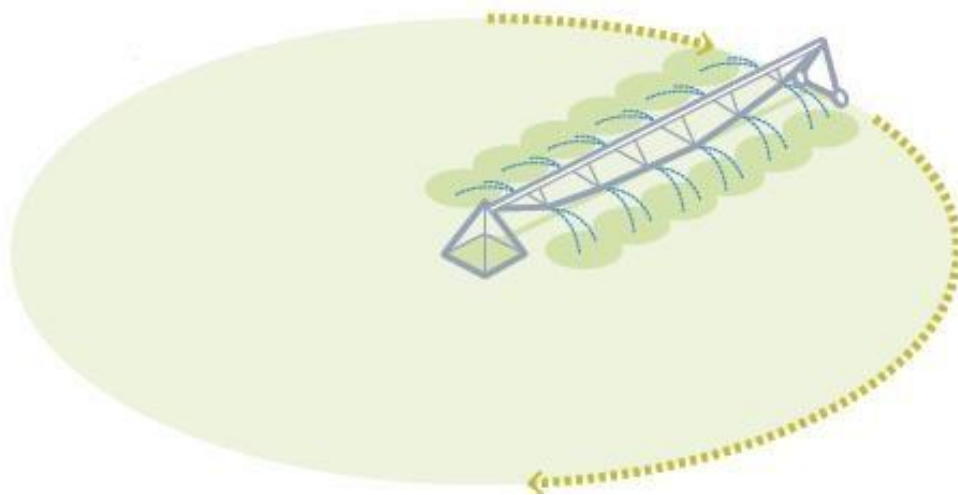
Figura 1 – Principais componentes do pivô central



Fonte: Garcez (2017).

A água a ser utilizada na irrigação é captada de rios, reservatórios, ou mesmo de poços de exploração de água subterrânea; através do bombeamento, geralmente com bomba centrífuga, a água é conduzida por meio de tubulações adutoras até à torre central do pivô. Essa torre, fixada no centro do pivô, permite que a água transportada pela adutora chegue até a tubulação aérea que acopla a torre central às torres móveis do sistema. As torres móveis apresentam formato de “A” e possuem, cada uma, um pequeno motor elétrico que pode ser acionado, em geral por energia elétrica. Esse motor é conectado a engrenagens de redução, compondo assim o conjunto moto-redutor, cujas engrenagens diminuem a rotação de 1160 para 30 a 59 rpm. A partir dele, eixos transmitem o movimento para as rodas da torre, onde existe o redutor da roda, ou seja, outro conjunto de engrenagens para diminuir ainda mais a rotação para 0,59 a 1,18 rpm. Essas torres são conectadas entre si por juntas flexíveis e sustentam uma única linha lateral metálica, onde são conectados tubos, reguladores de pressão e aspersores que distribuem a água sobre o solo em forma de chuva artificial contínua e uniforme (FIGURA 2) (ANA, 2019; GARCEZ, 2017).

Figura 2 – Representação do sistema de irrigação por aspersão via pivô-central.



Fonte: Adaptado de Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (ANA, 2019).

O pivô central é comandado pelo painel de controle, localizado na torre central do sistema; nele existem componentes relacionados à linha de alimentação, comando elétrico e segurança do sistema. O componente responsável por controlar a movimentação das torres móveis é o percentímetro, capaz de ajustar a velocidade da última torre móvel de acordo com o tempo necessário para que a lâmina irrigada supra, de maneira eficiente, as necessidades hídricas da cultura (GARCEZ, 2017). Em 100%, a torre move-se continuamente. Em 50%, a

torre move-se metade do tempo, enquanto a outra metade permanece parada. Cabe destacar que existem pivôs acionados por óleo hidráulico em que a velocidade das torres varia, sem interrupção do movimento.

As demais torres são controladas por meio de um sistema de alinhamento, que detecta a variação angular entre elas e aciona o motoredutor individual delas, movimentando-as até que estejam alinhadas novamente. O ângulo máximo de declinação entre vãos é da ordem de 5 a 6 graus. A velocidade máxima em que a última torre pode se deslocar no terreno é aproximadamente igual a 270 m h^{-1} (GARCEZ, 2017).

A área irrigada por um pivô central pode variar entre 10 e 200 ha por unidade e, caso seja realizada a fertirrigação, é necessário que o sistema esteja associado a um método de injeção de fertilizantes, como as bombas injetoras.

3.3 Materiais metálicos utilizados em pivôs centrais e em bombas injetoras

As tubulações, peças e acessórios que constituem um sistema de irrigação via pivô central, são majoritariamente feitas de metal, sendo que a escolha do material a ser utilizado é feita, basicamente, em função das variáveis hidráulicas do sistema, da qualidade da água e dos agroquímicos a serem transportados, das sobrecargas externas e do grau de segurança dos sistemas (TESTEZLAF; MATSURA, 2015). Usualmente, as linhas laterais do pivô central são constituídas por tubulações de aço galvanizado; já as peças e acessórios, como bombas, podem ser em aço inoxidável.

Peças de aço galvanizado são peças de aço que passam por um processo químico denominado galvanização para serem revestidas por uma camada de Zinco. Essa camada tem a finalidade de aumentar a vida útil do metal, porque o Zinco age como uma barreira que dificulta a ocorrência das reações de oxidação/corrosão (GENTIL, 2011; SHREYAS; PANDA; VISHWANATHA, 2019; TESTEZLAF; MATSURA, 2015). De acordo com Della Rovere et al. (2013), citado por Rodrigues (2019), a camada de Zinco utilizada em tubulações destinadas à irrigação possui uma espessura média de $90 \mu\text{m}$, sendo que após a ruptura da mesma, o aço base é exposto.

O aço galvanizado é fácil de ser moldado, é resistente, pode ser fabricado em diversas espessuras, possui boa resistência ao impacto, apresenta boas características hidráulicas para escoamento de fluido e resistência ao fogo (GENTIL, 2007; TESTEZLAF; MATSURA, 2015). Como aspectos negativos para a irrigação, tem-se que os materiais feitos desse aço são caros e pesados, os óxidos formados na camada galvanizada podem entupir os emissores do sistema e,

apesar de em menor proporção do que o aço carbono, também são suscetíveis à corrosão (TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

O aço inox é mais resistente à corrosão quando comparado com o aço galvanizado. Essa maior resistência é proveniente do seu elemento liga predominante, o Cromo, que ao reagir com o Oxigênio presente no meio, forma espontaneamente uma película de óxido de Cromo sobre o metal. Essa película, denominada como camada passivadora, tende a atuar como uma espécie de barreira entre o aço e o meio, o que pode retardar os processos de corrosão (ALMUALI et al., 2017; CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; CHENG et al., 2017; GENTIL, 2011; SHEN et al., 2017).

O aço inox é muito utilizado em ambientes severos, porque além de apresentar uma boa resistência à corrosão, é capaz de suportar temperaturas mais elevadas. Entretanto, seu custo é maior e sua soldagem e montagem é trabalhosa (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; CARBÓ, 2008; TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

3.4 Fertirrigação

A fertirrigação é uma técnica agrícola que consiste em aplicar fertilizantes e água por meio do próprio sistema de irrigação (BRAGA, 2010; DALRI et al., 2014; FRATONI et al., 2016; ORRICO et al., 2011). Quando bem planejada e executada, a fertirrigação satisfaz simultaneamente as necessidades hídricas e nutritivas da cultura, o que, adicionalmente à exposição à luz solar, são fatores primordiais para o bom desenvolvimento e alta produtividade das plantas (DALRI et al., 2014; TRANI; TIVELLI; CARRIJO, 2011).

Iniciada nos anos 50 por fazendeiros norte-americanos (EMBRAPA, 2007), a fertirrigação conquista os agricultores brasileiros de forma progressiva, fato que pode ser explicado pelas vantagens que essa prática traz quando comparada com a adubação convencional (OLIVEIRA et al., 2015; PEREIRA et al., 2016). Dentre seus principais benefícios, destacam-se a economia de tempo e mão de obra, a menor compactação do solo e danos físicos às culturas, além do melhor aproveitamento dos equipamentos de irrigação instalados (PERFEITO et al., 2017; SOUSA et al., 2011). Ainda, segundo Oliveira et al. (2015), na fertirrigação existe a possibilidade de se parcelar as aplicações dos nutrientes em doses que variam de acordo com a taxa de absorção da cultura. Essa prática aumenta a absorção dos nutrientes pela planta, diminui os riscos de contaminação ambiental e o desperdício de produtos (COELHO; SILVA, 2005; SOUSA et al., 2011). Igualmente, Sunny e Hakkin (2017) discorrem sobre os benefícios relacionados à eficiência da absorção dos fertilizantes, à diminuição dos

riscos ambientais e sobre a qualidade da produção.

A eficiência da fertirrigação está diretamente relacionada com o sistema de irrigação empregado, visto que o fertilizante é dissolvido e aplicado juntamente com a água a ser aplicada para irrigação (ZERIHUN et al., 2017). Sendo assim, essa prática é recomendada para métodos de irrigação pressurizados, nos quais a água é conduzida e aplicada por condutos sob pressão maior que a atmosférica, o que permite maior controle sobre a aplicação da água e dos fertilizantes nela dissolvidos (COSTA; BRITO, 1998; FRIZZONE et al., 2012; RODRIGUES et al., 2019). Além disso, sistemas pressurizados tendem a apresentar elevada uniformidade de aplicação de água. Entretanto, a eficiência da fertirrigação não está associada apenas ao sistema de irrigação empregado; fatores como a frequência da fertirrigação, tipo de solo, cultura e fertilizante afetam diretamente essa prática (SOUSA; PINTO; COELHO, 2009).

Como principais aspectos negativos da fertirrigação tem-se a possibilidade de redução da vida útil e/ou obstrução dos emissores do sistema de irrigação, elevado custo de implantação e a necessidade de conhecimentos básicos para a correta dosagem e concentração dos fertilizantes (REISSER JUNIOR, 2019; SILVA; FEITOSA FILHO, 2003).

3.5 Corrosão

Em princípio, a corrosão é tida como a deterioração gradual de um material metálico devido a sua interação química ou eletroquímica com o meio no qual está inserido (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; GENTIL, 2007). Entretanto, alguns autores também utilizam esse termo para relatar a degradação não metálica, visto que praticamente todo material reage de alguma forma com o ambiente em que se encontra (GENTIL, 2007).

3.5.1 Conceitos e mecanismos básicos da corrosão

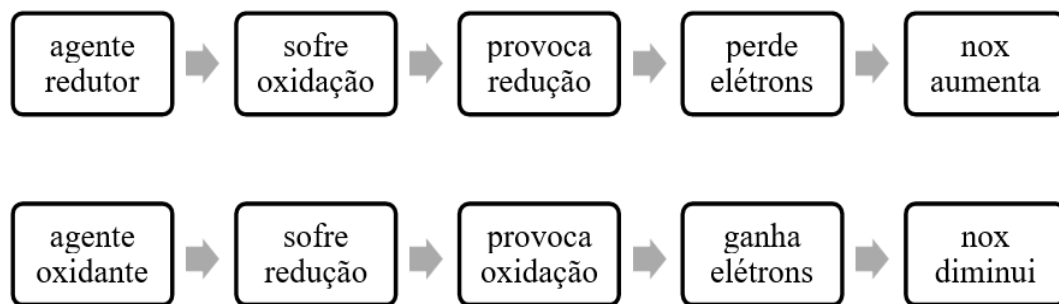
Os mecanismos para os processos da corrosão diferem-se em função do meio corrosivo e do metal utilizado (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; GENTIL, 2007). Esse trabalho concentra-se no mecanismo eletroquímico, que é o processo de corrosão metálica que prevalece em situações onde há a presença de água ou de soluções aquosas (FINAMORE, 2016; FURTADO, 1981; GENTIL, 2007; NUNES, 2007), como é o caso da fertirrigação.

Em síntese, a corrosão ocorre quando há uma reação de oxirredução, ou seja, quando há a transferência de elétrons de um átomo para outro; diz-se que o elemento que perdeu os elétrons oxidou e o que ganhou, reduziu. E ainda, denomina-se agente redutor o elemento que oxidou e

agente oxidante, o que reduziu. Esse é um processo simultâneo e sendo assim, sempre que há oxidação há também redução (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; GENTIL, 2007).

Ao perder elétrons, o número de oxidação (nox) do elemento aumenta e, ao ganhar elétrons, o nox diminui. O nox é entendido como a carga elétrica que um átomo adquire ao fazer uma ligação iônica ou a carga parcial que o mesmo adquire ao fazer uma ligação covalente. Para uma melhor compreensão dos conhecimentos aqui citados, seguem os esquemas do processo de oxirredução (FIGURA 3) (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; GENTIL, 2007).

Figura 3 – Fluxograma dos processos de corrosão.



Fonte: da autora (2021).

O potencial de oxidação-redução (redox) pode ser definido como a facilidade que determinado elemento possui de ganhar ou perder elétrons. Cada elemento apresenta um potencial intrínseco, sendo que quanto mais positivo for o potencial de redução, maior será a tendência do mesmo a ganhar elétrons, ou seja, de reduzir; do mesmo jeito que quanto mais positivo for o potencial de oxidação, maior será a tendência do mesmo a perder elétrons ou de se oxidar (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; GENTIL, 2007).

Os elementos de maior potencial de redução possuem maior eletronegatividade, tendência de absorver elétrons, enquanto os de menor potencial de redução, possuem maior eletropositividade (VINTURINI, 2019). Via de regra, o elemento mais eletronegativo recebe os elétrons do elemento mais eletropositivo, entretanto há situações nas quais essa transferência acontece de forma tão lenta, que em um pequeno espaço de tempo, os efeitos da corrosão sobre o elemento são mínimos ou inexistentes, como é o caso da oxidação da Prata (GENTIL, 2007).

Uma pilha corrosão é essencialmente constituída por um ânodo, um cátodo, um eletrólito e um circuito metálico e, retirando-se um desses componentes, a pilha é eliminada e a possibilidade de corrosão é diminuída. Denomina-se eletrólito um meio aquoso condutor de íons e elétrons; ânodo, o local no qual acontece a reação de oxidação (corrosão) e, cátodo, onde

ocorre a redução. Sendo assim, o agente redutor age como o ânodo da reação e o agente oxidante, como o cátodo (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; GENTIL, 2007).

Em uma situação hipotética envolvendo um metal M e uma solução suficientemente corrosiva X, os íons do metal tendem a passar para a solução pelo processo anódico, que por meio do circuito metálico, no sentido ânodo-cátodo, desencadeiam uma reação catódica, que nada mais é do que a reação que possibilita a recepção dos elétrons que foram cedidos pelo agente redutor (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; GENTIL, 2007). Pode-se dizer que a corrosão é o inverso do processo metalúrgico, cujo principal objetivo é a extração metálica a partir de minérios ou outros compostos, e sendo assim, de maneira antagônica, a corrosão tende a oxidar o metal, muitas vezes de forma espontânea, fazendo com que esse retorne a sua forma natural, ao composto do qual foi originado (GENTIL, 2007; ROSSI, 2007). A reação a seguir representa genericamente esse processo:



Todavia, a velocidade e a intensidade com que essas reações acontecem diferem-se em função do elemento e do meio ao qual o material está exposto, visto que esse processo está relacionado com o potencial redox do material para com o meio no qual está inserido (GENTIL, 2007). Assim, conhecer a ordem preferencial de oxidação e/ou redução de um elemento em relação a um meio corrosivo ou a outro material metálico é de grande valia no estudo da corrosão.

Nesse sentido, existem tabelas que permitem analisar a tendência de deterioração de elementos e materiais em dado meio corrosivo. A Tabela 2 apresenta a nobreza em água do mar dos metais e ligas metálicas, sendo popularmente utilizada para tanto, apesar de suas limitações (GENTIL, 2007). Diz-se que quanto maior a nobreza de um material, menor será sua tendência à corrosão (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012; GENTIL, 2007).

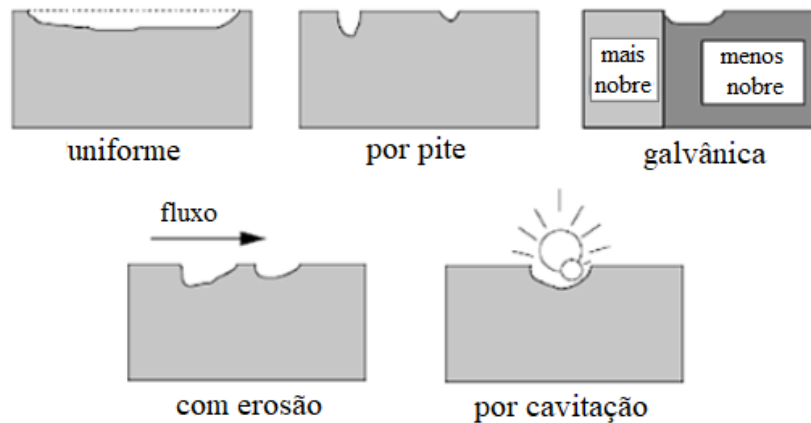
Tabela 2 – Tabela da nobreza dos metais e ligas metálicas em água do mar.

Extremidade anódica (corrosão)	
1. Magnésio	24.Latão Almirantado
2. Ligas de Magnésio	25.Latão Alumínio
3. Zinco	26.Latão Vermelho
4. Alclad 38	27.Cobre
5. Alumínio 3S	28.Bronze
6. Alumínio 61S	29.Cupro-Níquel 90/10
7. Alumínio 63S	30.Cupro-Níquel 70/30 (baixo teor de ferro)
8. Alumínio 52	31.Cupro-Níquel 70/30 (alto teor de ferro)
9. Cádmio	32.Níquel (passivo)
10. Aço doce	33.Inconel (passivo)
11. Aço baixo teor liga	34.Monel
12. Aço liga	35.Hastelloy C
13. Ferro fundido	36.Aço AISI 410 (passivo)
14. Aço AISI 410 (ativo)	37.Aço AISI 430(passivo)
15. Aço AISI 430 (ativo)	23.Aço AISI 304 (passivo)
16. Aço AISI 304 (ativo)	39.Aço AISI 316 (passivo)
17. Aço AISI 316 (ativo)	40.Titânio
18. Chumbo	41.Prata
19. Estanho	42.Grafite
20. Níquel (ativo)	43.Ouro
21. Inconel (ativo)	44.Platina
22. Metal Muntz	
23. Latão Amarelo	Extremidade catódica (proteção)

Fonte: Gentil (2007).

Os principais tipos de corrosão, apresentados na Figura 4, são: a uniforme, que acontece em toda ou quase toda a superfície do material; por pite ou puntiforme, que acontece de forma localizada, formando pequenas cavidades na superfície do material; galvânica, quando há, geralmente de forma induzida, o sacrifício de um metal menos nobre; por erosão, consequência do acúmulo das degradações provenientes do atrito de um eletrólito com a superfície; por cavitação, quando um líquido em movimento atinge sua pressão de vapor, formando bolhas capazes de degastar a superfície do material (GENTIL, 2007; ROBERGE, 2008).

Figura 4 – Principais tipos de corrosão.



Fonte: Adaptado de Cantarino (2014) original de Roberge (2011).

A corrosão atmosférica também é recorrente e ocorre porque a umidade do ar atua como eletrólito. Esse tipo de corrosão é extremamente dependente das condições locais e, de acordo com Roberge (2008), pode ser classificada como rural, industrial, urbana e marinha, sendo a corrosão atmosférica rural a menos agressiva, devido principalmente à qualidade do ar, em geral menos poluído (GENTIL, 2007; ROBERGE, 2008).

Independentemente do tipo de corrosão, ao longo dos anos, esse processo pode diminuir a espessura do metal, afetando negativamente a resistência mecânica do mesmo (EKER; YUKSEL, 2005).

3.5.2 Corrosão em aço galvanizado e aço inoxidável

De acordo com Gentil (2007), para que sejam evitados problemas relacionados à corrosão em materiais de aço galvanizado expostos a meios aquosos, o pH das soluções deve estar limitado entre 6 e 9, já que valores acima ou abaixo deste intervalo tendem a intensificar esse processo. O mesmo autor ressalta a necessidade de se evitar a exposição desse aço a temperaturas entre 65 e 75 °C, faixa na qual a camada de Zinco se torna porosa e menos aderente à superfície metálica, deixando o material mais suscetível à corrosão.

O aço inox tende a ser mais resistente às variáveis descritas, apresentando corrosão acentuada somente quando exposto a soluções com valores de pH abaixo de 2,5, valor no qual inicia-se o processo de dispersão da camada de óxido de Cromo sobre a superfície metálica, a chamada depassivação (CARBÓ, 2008). Quanto à temperatura, a corrosão do aço inox é intensificada somente quando submetido a valores acima de 80 °C (JOIA et al., 2002).

Já a condutividade elétrica e a velocidade de escoamento dos fluidos tendem a

influenciar a corrosão desses aços de forma semelhante. Isso acontece porque quanto maior a condutividade elétrica do meio aquoso, maior é a tendência de transferência de íons entre meio e metal (MERÇON; GUIMARÃES; MAINIER, 2011) e, quanto maior a velocidade de escoamento, maior a probabilidade de ocorrência da corrosão por erosão (RECLA, 2013).

Após o desgaste ou a ruptura pontual da camada de Zinco existente no aço galvanizado, o aço carbono é exposto ao meio e, desse momento em diante, a corrosão desse material é severamente intensificada (RODRIGUES; LIMA; THEBALDI, 2020). Já a corrosão do aço inox não é acelerada, em função do desgaste superficial desse material, visto que o Cromo, elemento químico que permite a formação da camada passivadora, está presente em toda sua composição e não apenas em sua superfície.

De acordo com a com a norma ASTM G31-72 (ASTM, 2004), a vida de um material metálico pode ser estimada pela perda de massa por unidade de superfície em dado espaço de tempo, em outras palavras, pela taxa de penetração da corrosão, ou ainda como é chamada por muitos pesquisadores, pela taxa de corrosão (GENTIL, 2007; OSTROSKI, 2019; VAZ; ACCIARI; CODARO, 2011).

Essa taxa pode ser classificada de acordo com a Norma RP-07-75, proposta pela National Association of Corrosion Engineers, em baixa, moderada, alta e severa, como indicado na Tabela 3 (NACE, 2013). Quando severa, a vida útil do material está significativamente comprometida pelo meio corrosivo ao qual está exposta.

Tabela 3 – Classificação da taxa de penetração da corrosão.

Taxa de corrosão uniforme (mm/ano)	Taxa de corrosão por pite (mm/ano)	Corrosividade
< 0,025	< 0,13	Baixa
0,025 a 0,120	0,13 a 0,20	Moderada
0,130 a 0,250	0,21 a 0,38	Alta
> 0,250	> 0,38	Severa

Fonte: Adaptado de National Association of Corrosion Engineers (NACE, 2013).

3.5.3 Corrosão dos sistemas de irrigação

A corrosão em sistemas de irrigação constituídos por peças metálicas é um problema comum na agricultura (RODRIGUES; LIMA; THEBALDI, 2020). Segundo Testezlaf e Matsura (2015), os equipamentos mais suscetíveis a esse problema são os que constituem os sistemas de bombeamento, as adutoras e as linhas de distribuição de água e existem diversos

fatores que podem contribuir para a intensificação desse fenômeno, estando entre eles a qualidade da água e a prática da fertirrigação.

A qualidade da água está diretamente associada às impurezas e contaminantes nela dissolvidos, como os sais, gases, materiais particulados e microorganismos e, também, às variações do sistema, como temperatura, pH e velocidade de circulação do fluido (ALVAREZ-BASTIDA et al., 2018; HU et al., 2018). De acordo com a Norma NBR 12212 proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992), certas águas podem ter ação corrosiva ou incrustante e os parâmetros utilizados como indicadores dessa característica estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Indicadores de ação corrosiva e incrustante

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

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992).

Águas corrosivas são aquelas capazes de corroer superfícies metálicas, bem como agredir superfícies de concreto, polímero, borracha e madeira, resultando na redução do tempo de vida desses materiais. Dentre os tipos de água, geralmente as superficiais são as mais corrosivas porque tendem a apresentar deficiência de íons cálcio e carbonato, os quais formam uma película protetora na superfície metálica e a isolam do contato com a água, o que reduz a corrosão (PEREZ, 2011).

A título de exemplo, um dos gases que podem estar dissolvidos na água é o cloro. Essa substância é adicionada para controle biológico, não estando presente naturalmente nos recursos hídricos. Ao reagir com água, o cloro forma ácido hipocloroso (HClO) e ácido clorídrico (HCl), (cloro livre), que reduz o pH da solução e pode acelerar gravemente a corrosão de diversos materiais como o aço carbono (VASCONCELOS; BROSEGUINI, 2013).

Assim como as substâncias presentes na água, as que compõem os fertilizantes também podem influenciar nos processos corrosivos. O potencial de corrosão dos fertilizantes varia de acordo com a composição química dos mesmos, do meio no qual estão inseridos e do estado físico em que se encontram, visto que quando em estado sólido, esses causam pouca ou nenhuma corrosão (RODRIGUES et al., 2019; ROFFEY, 2015).

Dentre os fertilizantes à base de Nitrogênio, a Ureia é um dos menos corrosivos, causando pouco ou nenhum dano em diversos materiais metálicos. Entretanto, se em concentrações elevadas, seus efeitos são agravados. Fertilizantes à base de Cloreto tendem a ser mais agressivos que a Ureia, como é o caso do Cloreto de Potássio. Isso acontece porque os íons Cloreto (Cl^-) são altamente reativos e tendem a dispersar ou penetrar nas camadas passivadoras dos metais (SILVA; BORGES, 2009).

Ressalta-se que a parte externa dos tubos, as peças e acessórios que são utilizados nos sistemas de irrigação e estão em contato com a atmosfera, também sofrem corrosão. Isso acontece em função das características climáticas locais, como umidade, poluição e a incidência de raios solares; no entanto, o foco desse trabalho é voltado apenas para as corrosões que ocorrem pelo contato entre a superfície metálica do tubo ou bomba e o líquido transportado.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento consistiu em simular os efeitos da corrosão, devido à prática da fertirrigação com Cloreto de Potássio branco e Ureia, em corpos de prova de aço galvanizado e aço inox AISI 304, materiais semelhantes aos usados em tubulações e bombas de injeção em sistemas de irrigação via pivô-central. O estudo se deu por meio de testes de corrosão por imersão, nos quais foram simulados os efeitos da corrosão devido à prática de 5 fertirrigações por ano, com duração de 7 horas cada, por um período de 10 anos.

Para tanto, foram instalados no Laboratório de Irrigação do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras, UFLA, 3 reservatórios de polietileno com capacidade de 1000 L, cada qual acoplado a uma bomba hidráulica periférica de ½ CV da marca Ferrari Acquapump (bombeador e rotor plástico) e conexões em PVC.

Os reservatórios eram constantemente abastecidos com água, por meio de um sistema hidráulico simples composto por tubos e conexões de PVC de 32 mm soldáveis, registro de esfera e boia. O abastecimento, ainda que mínimo, ocorreu para evitar o aumento da concentração das soluções por perda de solvente (água). Ainda, para garantir a movimentação dos fluidos dentro dos reservatórios, foi instalado um sistema de recirculação em cada tanque, os quais foram construídos com tubos e conexões de PVC de 32 mm soldáveis e 9 registros de esfera, 3 para cada reservatório. A Figura 5 representa o aparato desse experimento, que é análogo ao modelo proposto por Rodrigues, Lima e Thebaldi (2020) (FIGURA 6).

Figura 5 – Fotografias do aparato experimental. a) vista lateral frontal; b) vista lateral traseira. (Continua)

a)



Figura 5 – Fotografias do aparato experimental. a) vista lateral frontal; b) vista lateral traseira.
(Conclusão)

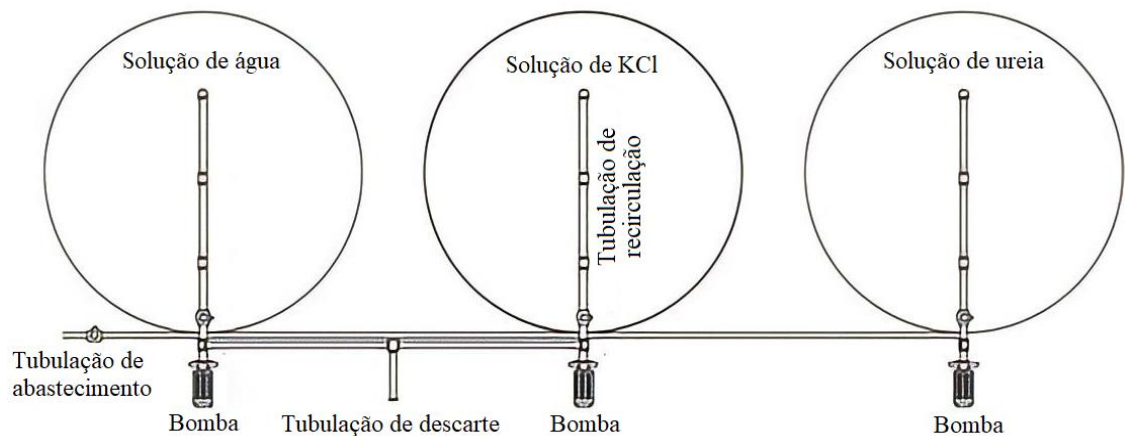
b)



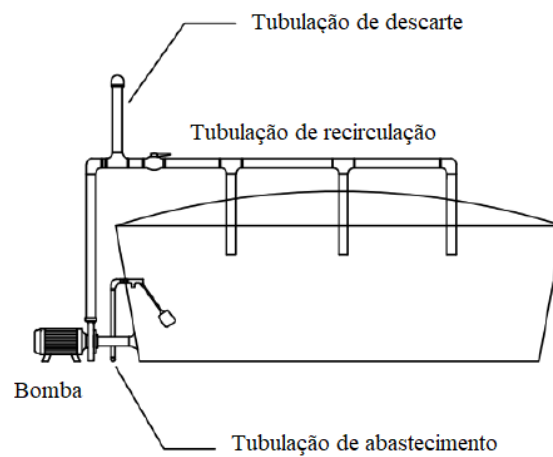
Fonte: da autora (2021).

Figura 6 – Esquema do aparato experimental. a) planta; b) corte.

a)



b)



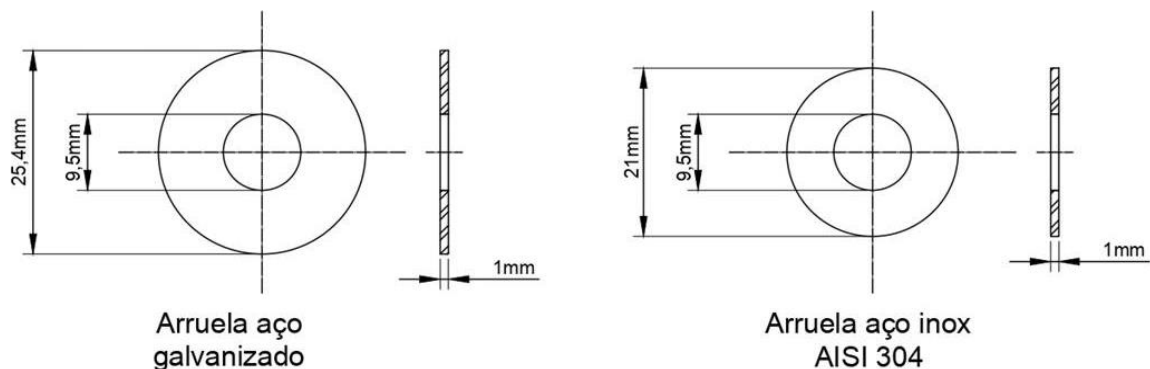
Fonte: Adaptado de Rodrigues, Lima e Thebaldi (2020).

Em um dos sistemas foi simulada a fertirrigação via pivô-central com Cloreto de Potássio branco, 10 g L^{-1} ; em outro com Ureia, 10 g L^{-1} e, por último, somente a irrigação. O intuito de se simular um sistema no qual havia apenas a irrigação, foi para o controle (referência) do experimento, possibilitando a comparação da corrosão causada pela solução de água sem fertilizantes com as soluções utilizadas na fertirrigação.

Os reservatórios foram abastecidos com 500 L de água e a concentração dos fertilizantes foi definida em função das condições de operação do sistema, do requerimento de fertilizantes por hectare e da presunção de que cada fertirrigação corresponda a uma volta completa do pivô-central no terreno. Para tanto, assumiu-se que a área a ser irrigada por cada pivô-central seria igual a 50 ha, que o requerimento anual de cada fertilizante seria igual a 1500 kg ha^{-1} e que todos os sistemas possuíam jornada diária igual a 21 horas, velocidade de deslocamento igual a 100% e lâmina de irrigação diária igual a 9 mm. Nessas circunstâncias, seriam necessárias 7 horas de operação para que o pivô completasse uma volta no terreno, no qual seria aplicada uma lâmina d'água de 3 mm, que seria equivalente a 1.500 m^3 de água em um pivô de 50 ha. Considerando o requerimento anual de cada fertilizante, 1500 kg ha^{-1} e 5 fertirrigações anuais, seriam necessários 300 kg ha^{-1} por fertirrigação, o que totaliza, para 50 ha, 15000 kg de fertilizante por fertirrigação. Assim, para que 15.000 kg fossem aplicados a cada fertirrigação, dissolvidos em 1500 m^3 , seria necessário que a concentração das soluções fosse igual a 10 g L^{-1} .

Os corpos de prova utilizados foram arruelas de aço galvanizado e de aço inox AISI 304, que foram compradas no mercado local e escolhidas ao acaso. Esses materiais são semelhantes àqueles utilizados em tubulações, peças e acessórios de sistemas de irrigação via pivô-central. As dimensões das amostras estão indicadas na Figura 7.

Figura 7 – Dimensões dos corpos de prova de aço galvanizado e aço inox AISI 304.

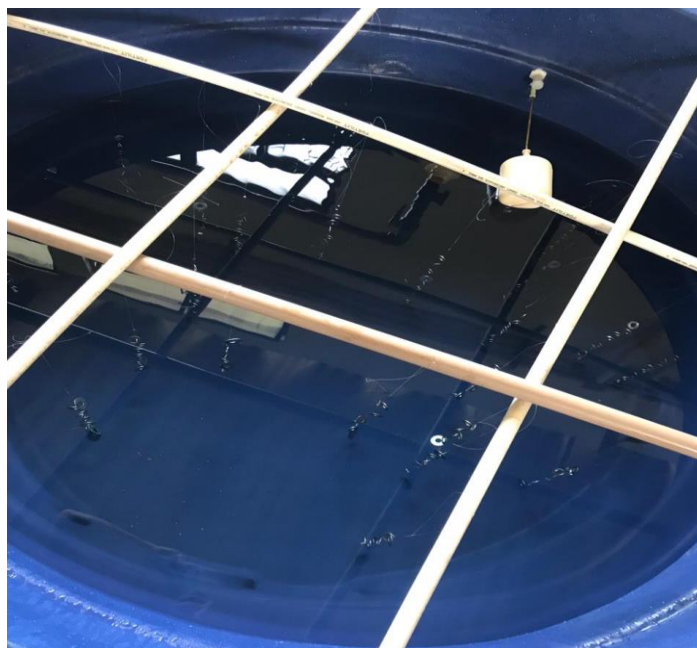


Fonte: da autora (2021).

As amostras foram suspensas dentro dos reservatórios de modo que ficassem totalmente

imersas e, para isso, foi acoplada uma estrutura de PVC em formato de cerquilha em cada caixa. Com um fio de nylon, os corpos de prova foram amarrados de forma que não se tocassem e foram distribuídos aleatoriamente nessa estrutura, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Distribuição dos corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304 dentro do reservatório.



Fonte: da autora (2021).

Para cada ano simulado, foram utilizados 20 corpos de prova por reservatório, 10 de cada material estudado. Assim, para 10 anos de simulação, foram utilizadas 200 arruelas por sistema, totalizando 600 amostras. O intuito de se utilizar amostras anuais é para que uma mesma amostra não seja submetida aos processos de análise da corrosão mais de uma vez, visto que algumas etapas do teste, como o aquecimento e a limpeza das arruelas, podem trazer erros ao experimento caso sejam repetidas em um mesmo corpo de prova.

4.1 Teste de corrosão por imersão e análise quantitativa dos corpos de prova

O experimento foi conduzido por meio de testes de corrosão por imersão, seguindo os procedimentos adaptados da Norma G1-03 da American Society for Testing Materials (ASTM, 2017). Os testes consistiram em imergir os corpos de prova nas soluções a serem analisadas por ciclos de tempo pré-determinados que correspondiam ao ano a ser simulado.

Assim, para este estudo, o ciclo de tempo correspondente a cada ano simulado equivaleu a 35 horas de imersão (5 fertirrigações x 7 horas de duração) e, portanto, para simular

os 10 anos, foram necessários 10 ciclos de 35 horas. Assim, as amostras referentes ao primeiro ano de simulação foram imediatamente retiradas e analisadas após 35 horas de imersão. Aqueles referentes ao segundo ano, após 70 horas, e assim sucessivamente. Ao todo, foram necessárias 350 horas de experimentação, totalizadas em 15 dias entre os dias 07/12/2020 e 21/12/2020.

Em concordância com a norma G1-03 (ASTM, 2017), os corpos de prova tiveram suas superfícies lixadas e polidas previamente à imersão, para que fosse possível corrigir alguma irregularidade em suas superfícies. Para tanto, foi utilizada a técnica de lixamento manual que consistiu em lixar a superfície das amostras com lixas d'água de granulometria cada vez menor (220, 320, 400 e 600 Mesh), rotacionando as amostras em 90° sempre que mudado a granulometria da lixa. Após lixados, os corpos de prova foram limpos com álcool etílico hidratado 70% e secos à temperatura ambiente.

Em sequência, as amostras foram pesadas individualmente em balança com exatidão de 0,0001g da marca Scientech, modelo SA 210 e depois imersas nos respectivos reservatórios para a realização dos ensaios. Imediatamente após o fim de cada ciclo, os corpos de prova foram retirados da imersão e secos em estufa de ventilação forçada da marca Marconi, modelo MA 035, por 30 minutos, a uma temperatura de 40°C .

A perda de massa por área dos corpos de prova foi calculada pela diferença entre a massa inicial e final das arruelas, ainda com os produtos de corrosão, pela área das amostras expostas às soluções.

Após esse processo, os corpos de prova foram pesados novamente, na mesma balança, mas dessa vez sem os produtos de corrosão. Para tanto, realizou-se a decapagem das amostras conforme a Norma G1-03 (ASTM, 2017), que propõe diferentes procedimentos de decapagem para diferentes materiais metálicos. A decapagem do aço galvanizado foi feita imergindo as amostras desse material por 5 minutos em uma solução contendo 100 g de Persulfato de Amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$ e 1000 mL de água, estando a temperatura da solução entre 20 e 25°C . Para o aço inox, a decapagem foi feita imergindo esses corpos de prova por 20 minutos em uma solução contendo 100 mL de ácido Nítrico (HNO_3) e 1000 mL de água, estando a solução em uma temperatura igual a 60°C .

Após a decapagem, as arruelas foram banhadas em água destilada e secas em estufa de ventilação forçada durante 30 minutos, a 40°C . Posteriormente, os corpos de prova foram pesados novamente, na mesma balança, desta vez sem os produtos de corrosão.

Como o processo de decapagem pode eventualmente remover parte da base metálica, ou seja, remover além dos produtos de corrosão, a Norma G1-03 (ASTM, 2017) solicita que a decapagem também seja realizada em amostras que não foram submetidas ao teste de imersão,

e assim, se houver diferença entre as massas final e inicial das arruelas, a média desses valores deve ser decrescida da perda de massa após a limpeza dos produtos de corrosão. Nesse sentido, esse procedimento foi realizado em 20 amostras de cada material e o valor médio obtido para o aço galvanizado foi igual a 0,083 g, com desvio padrão de 0,02 g; e para o aço inox, 0,007 g, com desvio padrão de 0,001 g. Esse processo é realizado no intuito de se minimizar os possíveis erros advindos da decaagem dos materiais.

A taxa de penetração da corrosão ou apenas taxa de corrosão, como é denominada por muitos pesquisadores, foi calculada empregando a Equação 1, proposta pela norma G1-03 (ASTM, 2017).

$$\text{TPC} = \frac{K \cdot W}{A \cdot t \cdot d} \quad (1)$$

Em que:

TPC: Taxa de penetração da corrosão, cm h^{-1} ;

K: constante de proporcionalidade tabelada;

W: perda de massa, g;

A: área da amostra, cm^2 ;

t: tempo de exposição, h;

d: massa específica do material, g cm^{-3} .

A perda de massa, “W” da Equação 1, refere-se à diferença entre a massa inicial dos corpos de prova, antes da imersão, e final, após a retirada dos produtos de corrosão, ou seja, decaagem.

Como a corrosão é um processo que não ocorre somente durante a fertirrigação, mas também durante a aplicação da técnica de irrigação, para se estimar a vida útil dos materiais metálicos utilizados deve-se considerar o tempo total de funcionamento do sistema. Nesse trabalho, semelhante ao proposto por Rodrigues (2019), foi estipulado que o tempo de operação anual dos pivôs centrais seria de 735 horas. Para os sistemas em que é praticada a fertirrigação, dessas 735 horas, 700 horas seriam destinadas à irrigação e 35 horas, à fertirrigação. Para os que não praticam, o tempo de operação total do sistema seria destinado, apenas, à irrigação.

Para o cálculo da perda de espessura média metálica após 10 anos de operação do pivô central, foi utilizada a Equação 2 para o sistema de irrigação e a Equação 3, para os sistemas praticantes da fertirrigação.

$$PE = K_{i10} \cdot 7350 \quad (2)$$

$$PE = (K_{f10} \cdot 350) + (K_{i10} \cdot 7000) \quad (3)$$

Em que:

PE: perda de espessura do material avaliado, μm ;

K_{i10} : taxa de corrosão média até o décimo ano simulado de irrigação, $\mu\text{m h}^{-1}$;

K_{f10} : taxa de corrosão média até o décimo ano simulado de fertirrigação, $\mu\text{m h}^{-1}$;

4.2 Análise qualitativa dos corpos de prova

A análise qualitativa dos corpos de prova foi feita por meio da comparação de figuras macroscópicas (fotografias) das amostras, antes e após serem submetidos aos testes de corrosão por imersão.

4.2 Qualidade da água de abastecimento

A água utilizada nesse experimento foi tratada e fornecida pela Universidade Federal de Lavras, a qual atende a Portaria n° 888/2021 do Ministério da Saúde que dispõe sobre os procedimentos de controle e qualidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011). Os valores médios das variáveis de qualidade: oxigênio dissolvido (OD), pH, condutividade elétrica (CE) e sólidos totais do mês em que foram realizados os ensaios, dezembro de 2020, podem ser vistos na Tabela 5. Esses dados foram fornecidos pelo Departamento de Engenharia Ambiental (DAM) da UFLA.

Tabela 5 – Dados médios mensais dos parâmetros de oxigênio dissolvido (OD), pH, condutividade elétrica (CE) e sólidos totais para o mês de dezembro de 2020 da água utilizada nesse experimento.

Qualidade da água UFLA - dezembro 2020				
Média do mês	OD (mg L^{-1})	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Sólidos dissolvidos (mg L^{-1})
Dezembro	7,01	7,14	87,23	211,39

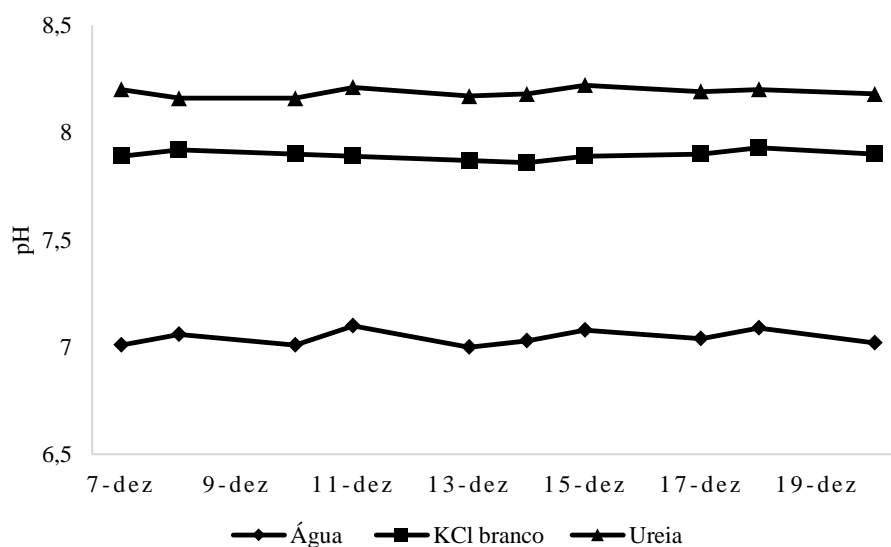
Fonte: Adaptado de dados fornecidos pelo Departamento de Engenharia Ambiental, UFLA.

4.4 Monitoramento da qualidade das soluções

O pH e a condutividade elétrica (CE) das soluções foram medidos ao início de cada ano simulado para que fosse possível manter um acompanhamento desses parâmetros. Para isso, as amostras foram retiradas dos reservatórios, dispostas em um balão volumétrico com tampa e capacidade de 100 mL e analisadas no Laboratório do Departamento de Engenharia Ambiental (DAM) da UFLA.

O pH foi medido com pHmetro de bancada, da marca Ms Tecnopon, modelo mPA210, o qual possui faixa de trabalho entre -2 e 20, exatidão de $\pm 0,01$. O menor valor encontrado foi para a solução de água, cujo pH oscilou de 7,0 a 7,1, seguido pela solução de Cloreto de Potássio branco, que variou de 7,86 a 7,93, e pela solução de Ureia, que oscilou de 8,16 a 8,22 (FIGURA 9).

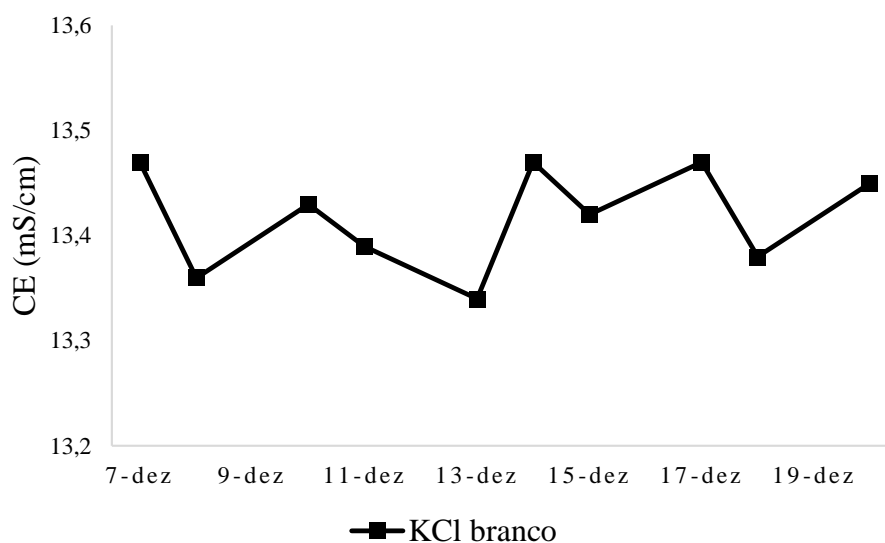
Figura 9 – pH das soluções de água, Cloreto de Potássio branco (KCl) e Ureia durante o período de simulação.



Fonte: da autora (2021).

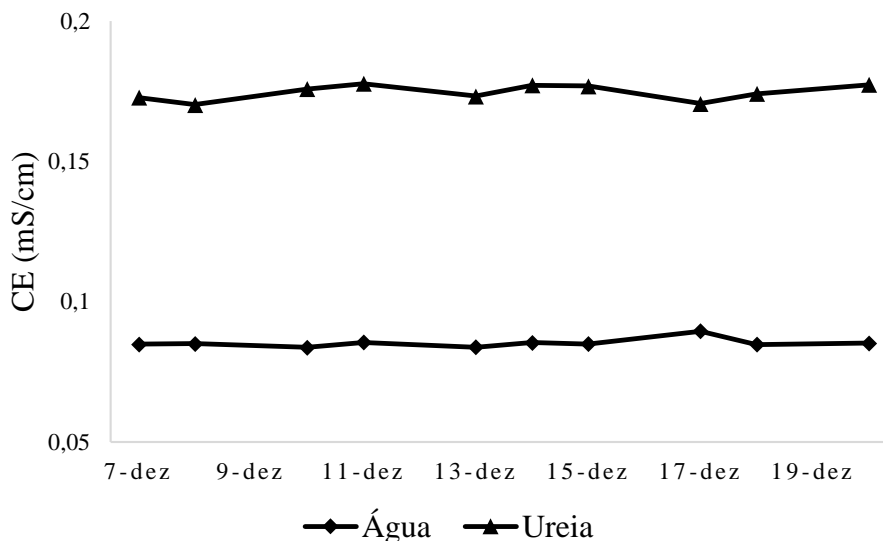
A CE foi medida com condutivímetro de bancada, da marca Simpla, modelo EC150, com compensação de temperatura automática e exatidão igual a $\pm 1,5\%$. O maior valor medido foi para a solução de Cloreto de Potássio branco, cujos valores da CE oscilaram entre 13,36 a 13,47 mS cm^{-1} (FIGURA 10), seguido pela solução de Ureia, que variou de 0,1703 a 0,1778 mS cm^{-1} e de água, que oscilou de 0,083 a 0,086 mS cm^{-1} (FIGURA 11).

Figura 10 – Condutividade elétrica (CE) da solução de Cloreto de Potássio branco (KCl) durante o período de simulação.



Fonte: da autora (2021).

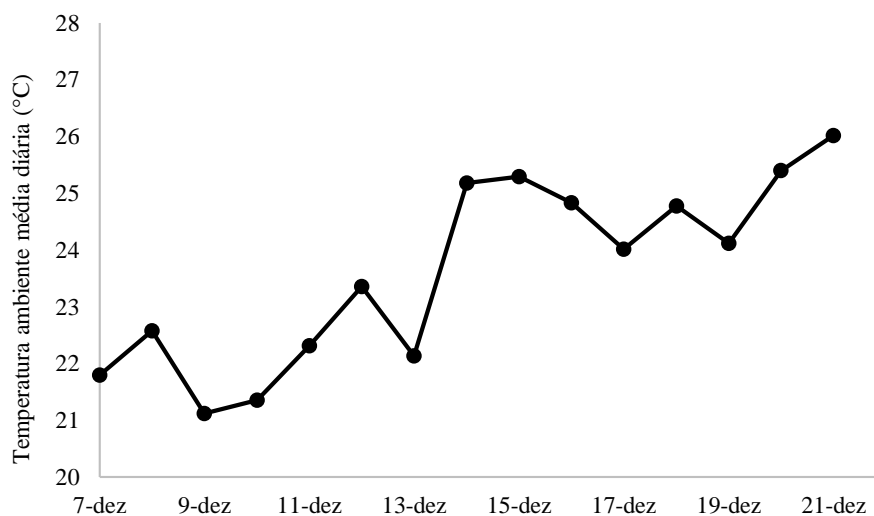
Figura 11 – Condutividade elétrica (CE) das soluções de água e de Ureia durante o período de simulação.



Fonte: da autora (2021).

Como a Norma G1-03 (ASTM, 2017) não especifica a temperatura de teste, o experimento foi conduzido à temperatura ambiente. A Figura 12 apresenta o comportamento da temperatura ambiente média diária para o município de Lavras-MG durante o período de experimentação, obtidos do banco de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021). Durante o período de condução do experimento, a temperatura média oscilou cerca de 5 °C, tendo como mínima 21,8 °C e como máxima 26,02 °C.

Figura 12 – Temperatura ambiente média diária para o município de Lavras, MG, durante o período de simulação.



Fonte: da autora (2021).

4.5 Delineamento experimental e análise estatística

Foi aplicado um experimento fatorial, o qual foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com três fatores: materiais metálicos (duas categoriais: aço galvanizado e aço inox AISI 304), soluções (três categoriais: água, Cloreto de Potássio branco (10 g L^{-1}) e Ureia (10 g L^{-1}) e anos (dez categoriais: um, dois, três, quatro, cinco, seis, sete, oito, nove e dez anos), o que totalizou 600 observações.

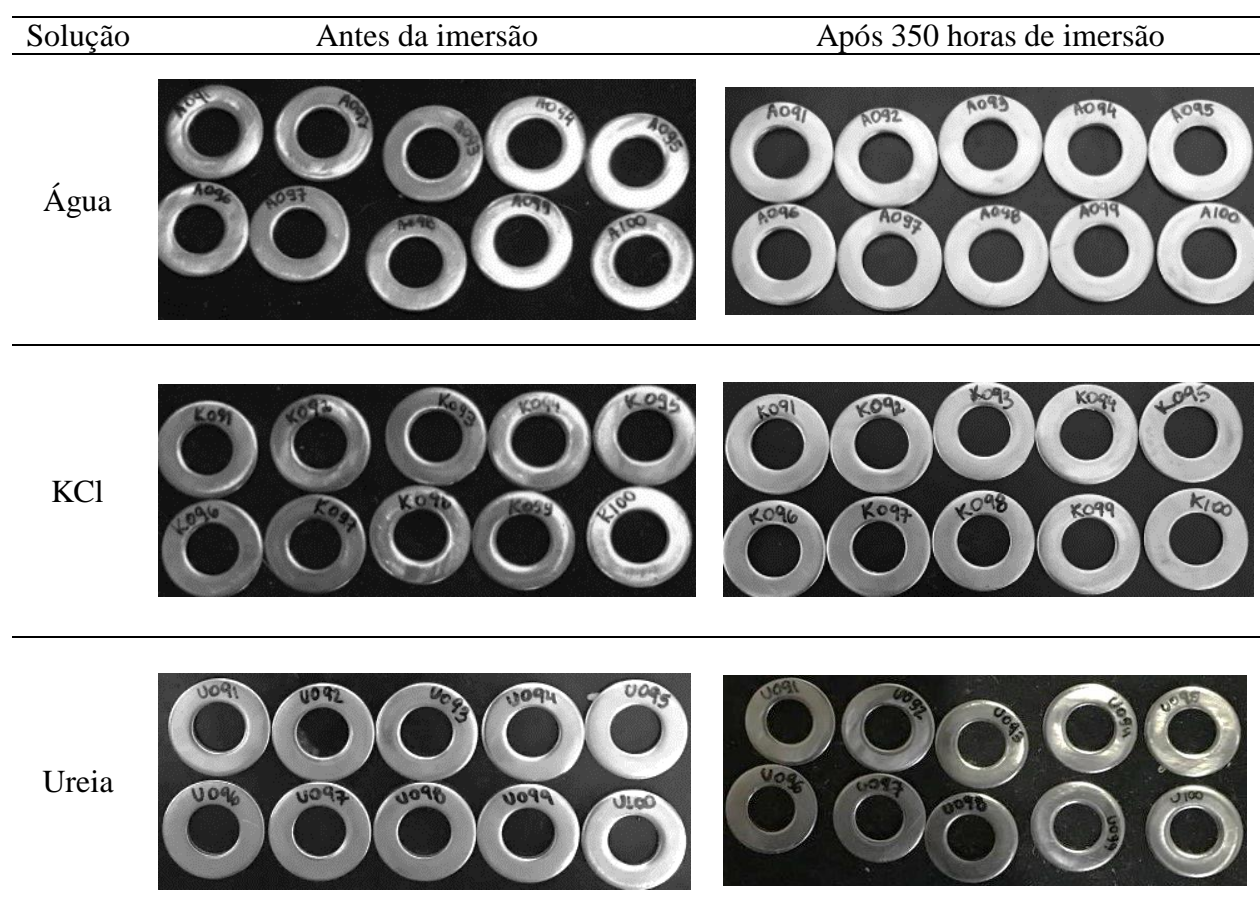
A análise da variância individual das variáveis estudadas foi realizada por meio do teste F. Os efeitos das fontes de variação qualitativas foram comparados pelo teste de Scott-Knott, com níveis de significância de 5%, enquanto os efeitos das fontes de variação quantitativas foram avaliados por meio de análise de regressão. Para tal, foi utilizado o software estatístico SISVAR em sua versão 5.6 (FERREIRA, 2014).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise qualitativa

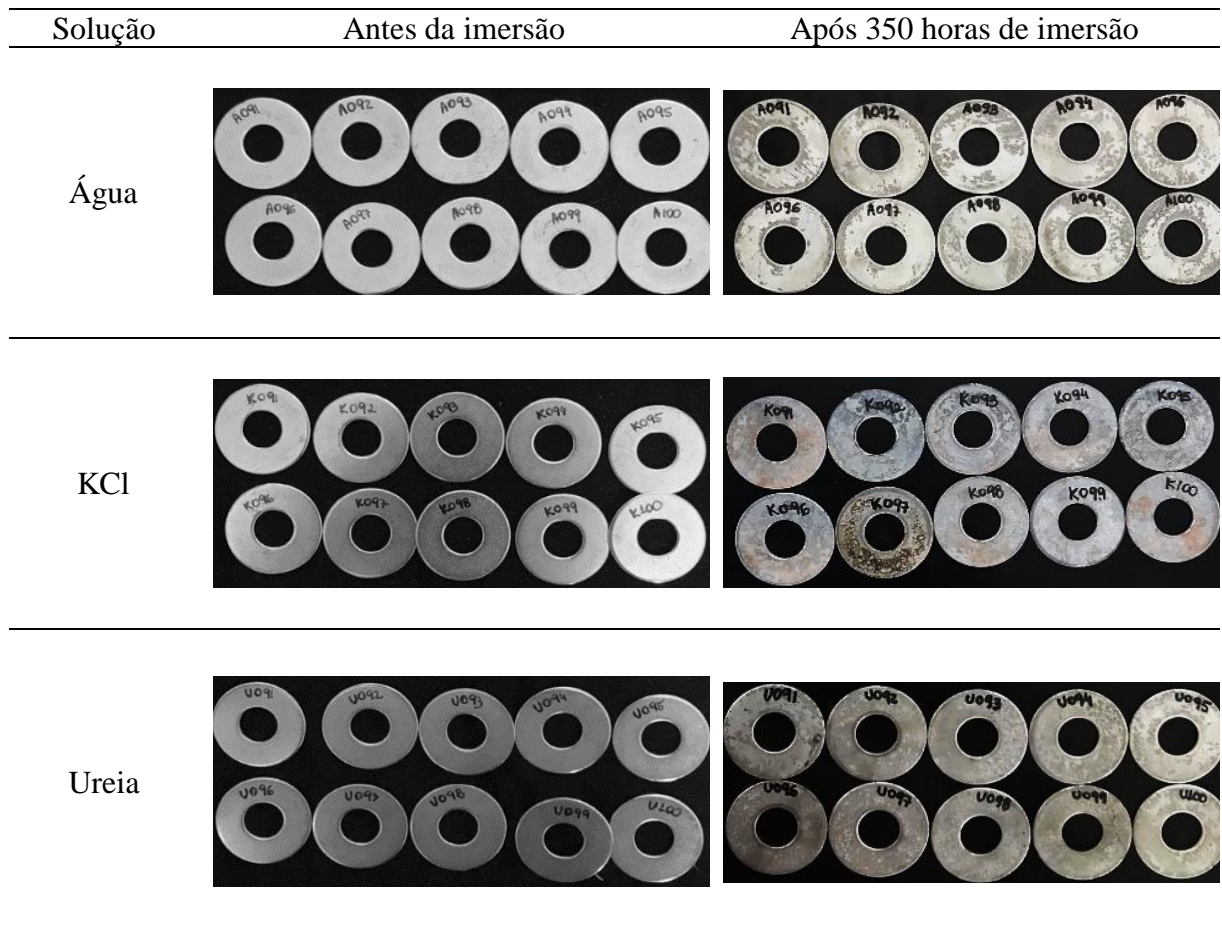
Notou-se, por meio da comparação visual macroscópica dos corpos de prova antes e após as simulações (APÊNDICES A, B, C, D, E e F), que as amostras de aço inox AISI 304 foram substancialmente menos atacadas pela corrosão do que as amostras de aço galvanizado. Enquanto, para todos os anos e soluções, os corpos de prova de aço inox se mantiveram visualmente semelhantes e os de aço galvanizado apresentaram alterações em sua coloração (FIGURAS 13 e 14).

Figura 13 – Corpos de prova de aço inox AISI 304 antes e após 350 horas de exposição em soluções contendo água, Cloreto de Potássio branco (KCl) e Ureia.



Fonte: da autora (2021).

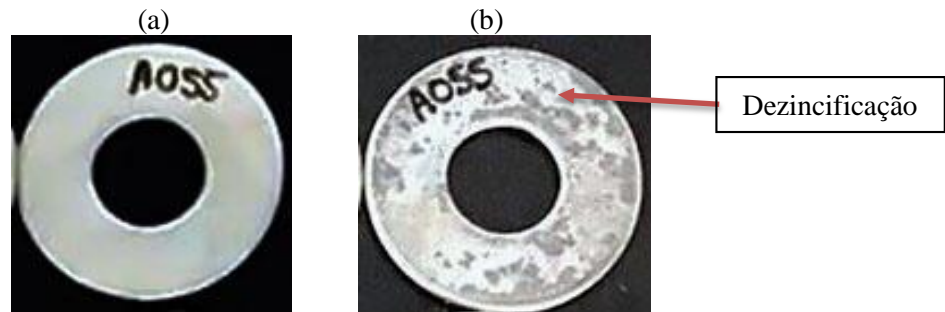
Figura 14 – Corpos de prova de aço galvanizado antes e após 350 horas de exposição em soluções contendo água, Cloreto de Potássio branco (KCl) e Ureia



Fonte: da autora (2021).

As mudanças visuais do aço galvanizado foram notadas a partir do primeiro ano de simulação para os corpos de prova expostos à solução contendo Cloreto de Potássio branco, e a partir do segundo ano para os corpos de prova expostos à solução de Ureia e de água. Esses materiais apresentaram pequenos pontos acinzentados e opacos em sua superfície, os quais se alastraram e adquiriram coloração mais esbranquiçada de forma progressiva ao ano simulado. Esse fenômeno foi atribuído como dezincificação, o que de acordo com Gentil (2011), é o produto de oxidação do Zinco (FIGURA 15).

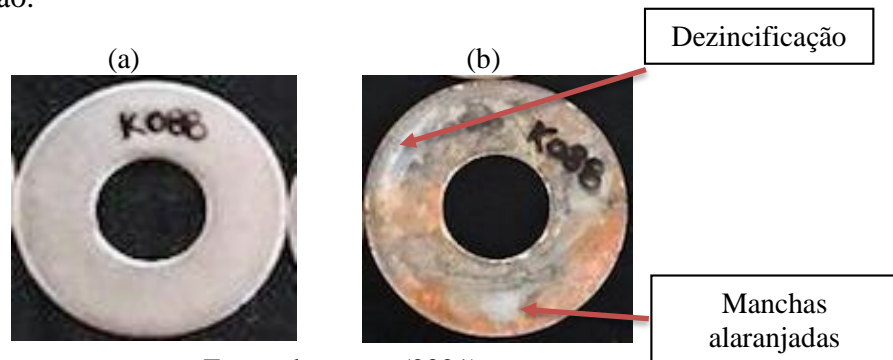
Figura 15 – Processo de dezincificação dos corpos de prova de aço galvanizado após serem submetidos às soluções analisadas. Sendo (a) aspecto de uma amostra antes da imersão e (b) aspecto de uma amostra após a imersão.



Fonte: da autora (2021).

Ainda, nas amostras de aço galvanizado expostas à solução de Cloreto de Potássio branco, foi constatado a partir do 6º ano de simulação, manchas de coloração mais alaranjada, semelhante à oxidação do ferro (FIGURA 16). Presume-se que a partir desse ciclo, a camada protetora de Zinco tenha se rompido e que a corrosão tenha chegado ao aço carbono, metal menos nobre que fica abaixo da camada de Zinco (GENTIL, 2011).

Figura 16 – Observação do processo de dezincificação e do aparecimento de manchas de coloração alaranjada nos corpos de prova de aço galvanizado submetidos à solução de Cloreto de Potássio branco na concentração de 10 g L^{-1} . (a) aspecto de uma amostra antes da imersão e (b) aspecto de uma amostra após a imersão.



Fonte: da autora (2021).

Delaunois, Tosar e Vitry (2014) e Maçaneiro et al. (2018) também relataram em seus estudos, a formação de uma camada esbranquiçada sobre os corpos de prova de aço galvanizado, o que, de acordo com os autores, confirmava a corrosão da camada de Zinco. Rodrigues (2019) constatou que suas amostras ganharam tonalidades alaranjadas e inferiu que esse fenômeno indicava a corrosão, devido à semelhança da cor observada com a cor característica da oxidação metálica.

Dentre as soluções estudadas, a de Cloreto de Potássio branco foi a que mais gerou

mudanças no aspecto visual dos corpos de prova de aço galvanizado. A aparência dos corpos de prova desse material que foram submetidas às soluções de água e Ureia foi similar, embora as amostras expostas à solução de Ureia tenham ficado mais esbranquiçadas do que aquelas expostas à água somente.

Já nas amostras de aço inox, não foram percebidas, em nenhum ano e para nenhuma solução, diferenças visíveis a olho nu. Semelhantemente, Souza (2019), estudando os efeitos da corrosão em aços inoxidáveis em solução de NaCl a 0,5M, não detectou mudanças de coloração visíveis na superfície do aço inox AISI 304 após imersão na solução. Fazal, Haseeb e Masjuki (2010), comparando os efeitos da corrosão em aço inox, Cobre e Alumínio expostos a óleo diesel e biodiesel de dendê, também observaram que, diferente dos outros materiais, o aço inox não apresentou variações de aspectos visuais em sua superfície, nem quando analisado em microscópio óptico com um aumento de 100 vezes.

A conservação do aspecto visual dos corpos de prova de aço inox pode ser explicada pela ativação da camada passivadora sobre a superfície da amostra, a qual isola o substrato do meio corrosivo no qual está inserido, o que diminui o ataque de corrosão sobre o mesmo e contribui para a preservação física do material (ALMUAILI et al., 2017; CHENG et al., 2017; GENTIL, 2011; SOUZA, 2019).

Percebe-se que os efeitos da corrosão sobre o aço galvanizado se deram de forma uniforme em toda ou quase toda superfície metálica (FIGURA 14 e APÊNDICES D, E e F) e, por esse motivo, então, infere-se que a corrosão desse metal tenha sido do tipo uniforme. Quanto ao tipo de corrosão dos corpos de prova de aço inox AISI 304, não foram detectadas alterações em escala macroscópica passíveis de serem verificadas a olho nu, que pudessem auxiliar em sua classificação. No entanto, sabe-se que a corrosão localizada, principalmente a do tipo pite é muito comum em aços inoxidáveis, sendo seus efeitos iniciais muitas vezes imperceptíveis a olho nu (ALMUAILI et al., 2017; CHENG et al., 2017; COSTA, 2012; DOLABELLA, 2016; JINLONG; MENG; TONGXIANG, 2017).

Como os valores referentes à temperatura ambiente (FIGURA 12), condutividade elétrica (FIGURAS 10 e 11) e pH (FIGURA 9) das soluções não apresentaram variações relevantes ao longo de todo o experimento, tem-se que as variações ocorridas nos valores destas variáveis de qualidade da água não influenciaram os efeitos da corrosão sobre os aços estudados durante as simulações. Quanto à qualidade da água de abastecimento utilizada na produção das soluções, de acordo com a NBR 12212 (ABNT, 1992), somente o oxigênio dissolvido (TABELA 5) apresentou valores acima do recomendado para que as águas não sejam corrosivas, cerca de 3,5 vezes mais que o limite de $2,0 \text{ mg L}^{-1}$ estabelecido pela norma, o que indica que a água apresenta caráter corrosivo.

5.2 Análise Quantitativa

O resumo da ANOVA realizada para a avaliação da perda de massa por área dos corpos de prova e da taxa de penetração da corrosão do aço galvanizado e do aço inox AISI 304, em função das soluções estudadas e do tempo simulado, está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo da ANOVA realizada na avaliação de perda de massa por área e da taxa de penetração da corrosão dos corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304 submetidos a soluções de água, Cloreto de Potássio branco (10g L^{-1}) e Ureia (10g L^{-1}) e diferentes tempos de exposição.

Fonte de Variação	GL	Perda de massa		Taxa de penetração	
		F Calculado	Valor - P	F Calculado	Valor - P
Aço (A)	1	19,652*	0,0000	33,319**	0,0000
Tempo (T)	9	1,086ns	0,3710	2,656**	0,0051
Solução (S)	2	5,899*	0,0029	2,029 ns	0,1234
AxT	9	1,028ns	0,4163	2,171*	0,0226
AxS	2	11,997*	0,0000	3,280*	0,0354
TxS	18	0,512ns	0,9529	0,136ns	1,0000
AxTxS	18	0,681ns	0,8314	0,108ns	1,0000
Erro	540	-	-	-	-
Total corrigido	599	-	-	-	-
Número de observações	600	-	-	-	-

Legenda: ns - não significativo. * - significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. ** - significativo pelo teste F a 1% de probabilidade.

Fonte: da autora (2021).

Como pode ser observada na Tabela 6, a variação da fonte de solução, o tipo de aço, bem como a interação dupla entre eles, tiveram efeitos estatisticamente significativos pelo teste F sobre a perda de massa por área. Já para a análise da taxa de penetração da corrosão, os resultados revelaram significância para a fonte de variação “aço” e “tempo” e para a interação dupla entre esses fatores e entre os fatores “aço” e “solução”.

5.2.1 Perda de massa por área

Na Tabela 7 estão apresentadas as médias do efeito simples do fator “aço” sobre a perda de massa por área dos materiais analisados. Pelos resultados obtidos, constatou-se que a perda de massa média do aço galvanizado foi aproximadamente 9 vezes superior à do aço inox AISI 304. Tal fato pode ser explicado pelo elemento liga predominante do aço inox, o Cromo, que em contato com oxigênio, possibilita a formação de uma camada passivadora na interface metal-

meio, a qual apresenta baixa solubilidade e atua como uma barreira protetora, proporcionando uma maior resistência à corrosão para esse material quando comparado com o aço galvanizado (ALMUAILI et al., 2017; CHENG et al., 2017; GENTIL, 2007; SHEN et al., 2017).

Tabela 7 – Médias da perda de massa por área dos corpos de prova de aço galvanizado e aço inox AISI 304 submetidos a soluções de água, Cloreto de Potássio branco (10g L^{-1}) e Ureia (10g L^{-1}).

Material	Perda de massa (kg m^2)
Aço Galvanizado	1,21 a
Aço Inox AISI 304	0,14 b

Fonte: da autora (2021).

Salienta-se que a camada de Zinco que reveste o aço galvanizado também atua como uma barreira protetora, que retarda os efeitos da corrosão, (SHREYAS; PANDA; VISHWANATHA, 2019). No entanto, quando comparado com o aço inox, o aço galvanizado tende a reagir mais facilmente com o meio, o que lhe confere maior suscetibilidade à corrosão (GENTIL, 2011; MAÇANEIRO et al., 2018), o que foi evidenciado na análise qualitativa.

Maçaneiro et al. (2018), ao pesquisarem sobre o desempenho de materiais metálicos expostos a águas residuais de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), constataram que a perda de massa do aço galvanizado foi superior à obtida para o aço inox AISI 304. Semelhantemente, Almeida e Silva (2017), ao analisarem a influência de agentes químicos na corrosão de diferentes materiais, verificaram que a perda de massa do aço inox AISI 304 foi significativamente menor do que a determinada para o aço galvanizado.

O efeito simples da variação das soluções sobre a perda de massa por área dos materiais analisados pode ser visto na Tabela 8. Ao analisar a perda de massa em função do efeito das soluções, percebe-se que a solução de Cloreto de Potássio branco foi a que provocou maior perda de massa. A agressividade dessa solução é explicada pelo fato de que, quando em meios aquosos, os íons Cloreto (Cl^-), presentes no Cloreto de Potássio, desestabilizam a camada passivadora dos metais, tornando-as mais permeáveis, o que diminui a sua proteção e acelera a corrosão metálica (DIAS; CÂNDIDO, 2008).

Tabela 8 – Médias da perda de massa por área dos corpos de prova submetidos a soluções de água, Cloreto de Potássio branco (10 g L^{-1}) e Ureia (10 g L^{-1}).

Soluções	Perda de massa (kg m^{-2})
Água	0,47 b
KCl	1,26 a
Ureia	0,31 b

Fonte: da autora (2021).

Os efeitos sobre a perda de massa de materiais metálicos expostos a soluções contendo íons Cloreto também foi constatado por Fonseca et al. (2020) e Mariano et al. (2006). Esses autores observaram que quanto maior a concentração de Cl^- na solução, maior era a tendência de desestabilização da camada passivadora do metal e, conseqüentemente, maior era a perda de massa da peça.

Na Tabela 9, podem ser vistas as médias da perda de massa por área para a interação dupla entre as fontes de variação “aço” e “solução” dos corpos de prova avaliados.

Tabela 9 – Médias da perda de massa por área dos corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304 submetidos a soluções de água, Cloreto de Potássio branco (10 g L^{-1}) e Ureia (10 g L^{-1}).

Solução	Perda de massa (kg m^{-2})	
	Aço Galvanizado	Aço Inox
Água	0,45 Ab	0,48 Aa
KCl	2,62 Aa	-0,10 Ba
Ureia	0,57 Ab	0,04 Aa

Legenda: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas linhas e mesmas letras minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade estatística.

Fonte: da autora (2021).

Percebe-se que, para o aço inox, a perda de massa não diferiu estatisticamente em função da variação das soluções. Já para o aço galvanizado, houve semelhança somente entre as amostras que foram expostas às soluções de água e de Ureia, o que permite concluir que a água utilizada é tão corrosiva quanto a solução de Ureia testada.

Como pode ser observado na Tabela 9, a interação dupla entre aço inox e Cloreto de Potássio branco resultou em uma perda de massa média com índice negativo, o que indica ganho de massa ao invés de perda. Tal fato sugere a intensificação da camada passivadora e a formação de corrosão, em que os produtos formados ficaram adsorvidos na superfície metálica e foram contabilizados na pesagem dos corpos de prova.

A passivação do aço inox resulta da formação de uma camada de óxido de Cromo sobre a

superfície metálica, a qual apresenta características poucos solúveis e atua como uma barreira protetora que isola o metal dos efeitos corrosivos do meio no qual está inserido. Essa camada aderente apresenta uma espessura de 3 a 5 nm, o que agrega um pequeno peso ao metal (COSTA, 2012).

Esses resultados corroboram com os obtidos por Costa (2012), que estudou os efeitos da corrosão em aço inox AISI 304 exposto a soluções contendo álcool etílico hidratado combustível e constatou que a partir do momento em que houve considerável aumento da cinética de formação de pites no aço inox, a atividade passivadora metálica também aumentou. Desse momento em diante, a perda de massa causada pela corrosão passou a ser pequena em relação à ganhada pela camada de repassivação, até que se tornou desprezível e, posteriormente, negativa.

A autora explicou esse acontecimento por meio da análise por Microscopia Eletrônica de Varredura dos corpos de prova, a qual permitiu constatar que parte dos produtos de corrosão formados não foram solubilizados e sim depositados em volta da cavidade do pite, o que, somado com a película passivadora que foi formada sobre o metal, contribuiu para o aumento de massa da amostra e resultou numa perda de massa com índice negativo. Esse fenômeno pode justificar ainda o motivo pelo qual a solução de Ureia, que apesar de mais corrosiva que a solução de água, ter sido a solução que gerou menor perda de massa por área (TABELA 7). Percebe-se ainda, que os valores médios de perda de massa para a solução de água foram muito próximos para os dois metais, sendo que para o aço galvanizado, essa foi a solução que gerou menor perda de massa. Acredita-se que a média obtida para essa solução para o aço galvanizado tenha sido menor, porque os produtos que foram adsorvidos à superfície metálica serviram como uma barreira protetora, retardando a corrosão.

Quanto à interação entre os fatores “aço” e “tempo”, apesar de não terem sido encontradas diferenças significativas pelo teste F a 1 e 5% de probabilidade, o teste de média de Scott-Knott indicou diferenças significativas para o desdobramento do fator aço nos anos 7, 9 e 10 (TABELA 10).

Tabela 10 – Médias de perda de massa por área dos corpos de prova de aço galvanizado e Inox 304 em cada ano simulado de fertirrigação.

Tempo acumulado de fertirrigação (anos)	Tempo acumulado (horas)	Perda de massa (kg m ⁻²)	
		Aço Galvanizado	Aço Inox
1	35	0,12 a	0,14 a
2	70	0,34 a	0,06 a
3	105	0,71 a	0,17 a
4	140	0,91 a	0,06 a
5	175	1,24 a	0,06 a
6	210	1,34 a	0,07 a
7	245	1,63 a	-0,05 b
8	280	1,64 a	1,04 a
9	315	1,67 a	-0,15 b
10	350	2,53 a	0,01 b

Legenda: Valores seguidos de mesmas letras minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade estatística.

Fonte: da autora (2021).

O aço inox apresentou perda de massa negativa no 7° e 9° ano de simulação o que, conforme discutido anteriormente, indica o ganho de massa dos corpos de prova. Esse ganho sugere que, a partir do 7° ano, houve aumento na cinética de formação da corrosão por pites com a intensificação da camada passivadora, estando os produtos formados adsorvidos à superfície metálica. No 8° ano, a perda de massa média aumentou significativamente em relação às demais, sugerindo que os produtos de corrosão antes adsorvidos na superfície foram solubilizados e, ainda, que houve depassivação da camada protetora. Já no 9° ano, a perda de massa torna a decrescer, o que sugere a repassivação do material e a adsorção dos produtos de corrosão à superfície metálica. Costa (2012) explica esse fenômeno pela ocorrência do aumento da corrosão e da repassivação, seguida do rompimento e nova passivação do material.

Nota-se também que a perda de massa do aço galvanizado aumentou de forma progressiva até o 6° ano, apresentando pouca variação entre o 7° e 9° ano, seguida de um enorme salto no 10° ano. Sugere-se que no 8° e 9° ano de simulação, houve grande adsorção dos produtos de corrosão sobre às superfícies metálicas, os quais foram contabilizados na pesagem e contribuíram para que a perda de massa por área fosse, de certo modo, estabilizada. Já no 10° ano, acredita-se que esses produtos tenham se solubilizado e que a camada protetora de Zinco tenha se rompido, expondo o aço carbono ao meio e fazendo com que a corrosão fosse intensificada (GENTIL, 2011).

Almeida e Silva (2017) também constataram em seus estudos que o aço galvanizado apresentou uma perda de massa significativamente maior quando a camada de Zinco se rompeu. Os autores relatam que após o colapso dessa barreira, a perda de massa do aço galvanizado foi

compatível com a perda de massa do aço Carbono 1010, metal menos nobre.

5.2.2 Taxa de penetração da corrosão

Na Tabela 11, estão apresentadas as médias do efeito simples da variação do fator “aço” sobre a taxa de penetração da corrosão dos materiais analisados. Pode-se observar, na referida tabela, que a taxa de penetração da corrosão no aço inox AISI 304 foi menor que a do aço galvanizado. Esse resultado apoia os obtidos anteriormente para a perda de massa, nos quais o aço inox também foi menos atingido pela corrosão, resultado esse que se assemelha aos obtidos por Almeida e Silva (2017) e Maçaneiro et al. (2018) que, ao avaliarem os efeitos da corrosão sobre os mesmos materiais, constataram taxa de penetração da corrosão superior para o aço galvanizado.

Tabela 11 – Médias da taxa de penetração da corrosão dos corpos de prova de aço galvanizado e aço inox AISI 304.

Material	Taxa de penetração da corrosão (nm h ⁻¹)
Aço Galvanizado	21,75 a
Aço Inox AISI 304	2,39 b

Fonte: da autora (2021).

Na Tabela 12, pode ser vista a taxa de penetração de corrosão média para a interação dupla entre as fontes de variação “aço” e “solução”. Para o aço galvanizado, a solução que gerou maior taxa de penetração da corrosão foi a de Cloreto de Potássio branco, 32 nm h⁻¹, seguida pelas soluções de Ureia e água sem a presença de fertilizantes, que não diferiram estatisticamente entre si. Observa-se, ao comparar esses valores com os apresentados na Figura 9 e nas Tabelas 6 e 10 para esse material, que quanto maior a condutividade elétrica da solução, maior é a perda de massa por área e maior é a taxa de penetração da corrosão. Isso acontece porque, quanto maior a condutividade elétrica do meio aquoso, maior é a tendência de transferência de íons entre meio e metal, o que acelera a corrosão (MERÇON; GUIMARÃES; MAINIER, 2011).

Tabela 12 – Médias da perda de massa por área dos corpos de prova de aço galvanizado e inox AISI 304 submetidos a soluções de água, Cloreto de Potássio branco (10g L⁻¹) e Ureia (10 g L⁻¹).

Solução	Taxa de penetração da corrosão (nm h ⁻¹)	
	Aço Galvanizado	Aço Inox
Água	14,38 Ab	2,50 Ba
KCl	32,28 Aa	0,88 Ba
Ureia	18,61 Ab	3,80 Ba

Legenda: Valores seguidos de mesmas letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade estatística.

Fonte: da autora (2021).

Para o aço inox, a taxa de penetração da corrosão não diferiu estatisticamente em função da variação das soluções. Ao analisar os valores obtidos para a perda de massa desse material, apresentados na Tabela 9, pode-se inferir que o ganho de massa causado pela solução de Cloreto de Potássio branco permitiu a proteção da superfície metálica, o que causou uma diminuição da corrosão.

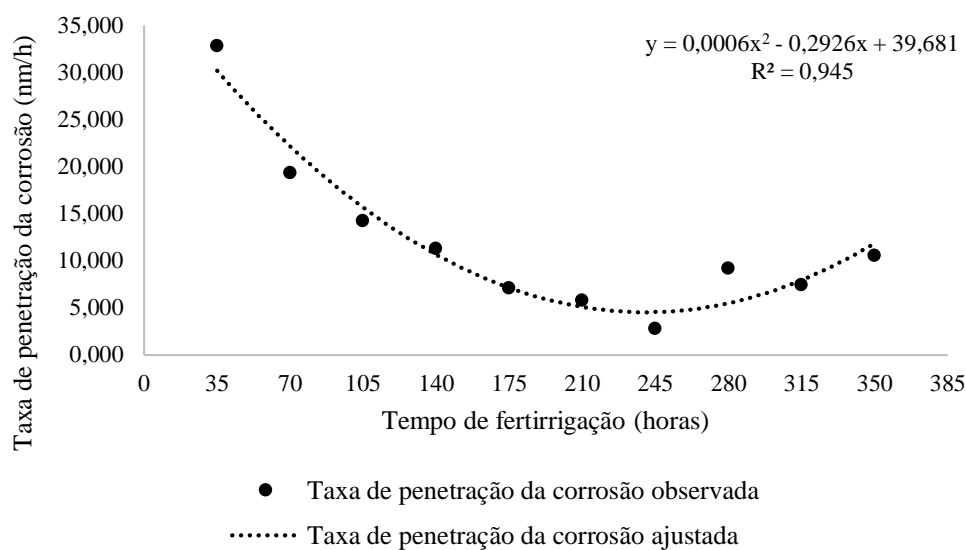
Para as soluções em que não houve ganho de massa, a taxa de penetração da corrosão provavelmente se deu em função da condutividade elétrica (FIGURAS 10 e 11 e TABELA 12). Pereira (2013), analisando a resistência à corrosão de aços inoxidáveis em meio à glicerina ácida, constatou maior corrosividade da solução com maior condutividade elétrica em relação à de menor.

Observa-se, na Tabela 12, que a taxa de penetração da corrosão foi sempre superior para o aço galvanizado, o que mais uma vez comprova a sua maior suscetibilidade à corrosão em relação ao aço inox AISI 304.

Considerando-se que a corrosão do aço galvanizado tenha sido do tipo uniforme, a do aço inox do tipo pite e, a partir dos valores observados para a taxa de penetração da corrosão (TABELA 12), a corrosividade em ambos os aços, em relação aos meios e condições que foram expostos, a taxa pode ser classificada como baixa, de acordo com a National Association of Corrosion Engineers (TABELA 3).

Na Figura 17, pode ser visto o efeito simples da fonte de variação “tempo” sobre a taxa média de penetração de corrosão das situações analisadas. A estimativa desse efeito foi melhor representada por uma função quadrática, com R² de 94,5%.

Figura 17 – Efeito do tempo de exposição dos corpos de prova em soluções de água, Cloreto de Potássio branco (10 g L^{-1}) e Ureia (10 g L^{-1}).



Fonte: da autora (2021).

Observa-se, na Figura 17, que a taxa de penetração média decresce de 32,87 nm/h para 2,79 nm/h nas primeiras 245 horas, o que pode ser explicado pela ativação da camada passivadora e adsorção dos produtos de corrosão sobre a superfície metálica, os quais agiram como barreira protetora retardando a taxa de penetração. Já na hora 280, nota-se que a taxa de penetração cresce para 9,23 nm/h, decrescendo para 7,43 nm/h na hora 315 e crescendo novamente para 10,59 nm/h, na hora 350. Essa oscilação pode ser explicada pela depassivação e solubilização dos produtos de corrosão, a qual foi seguida pela repassivação e readsorção dos produtos de corrosão e posterior depassivação e solubilização (COSTA, 2012).

As taxas médias de penetração de corrosão para o desdobramento do fator “aço” dentro de cada nível do fator “tempo” podem ser vistas na Tabela 13. Percebe-se na referida tabela que, excetuando o 8º e 10º ano, que a taxa de penetração do aço galvanizado decresceu, o que sugere a adsorção dos produtos de corrosão na superfície metálica e a intensificação da camada passivadora, o que protegeu o metal do meio ao qual estava exposto, diminuindo assim, a taxa de penetração de corrosão. Nos anos em que houve crescimento das médias, possivelmente houve a solubilização dos produtos de corrosão e depassivação da camada de óxido de Zinco, o que expôs a superfície metálica e fez com que a penetração fosse acentuada.

Tabela 13 – Taxa de penetração de corrosão dos corpos de prova de aço galvanizado e aço inox AISI 304 em diferentes tempos de exposição (Continua).

Ano de fertirrigação simulado (ano)	Tempo (horas)	Taxa de penetração da corrosão (nm h ⁻¹)	
		Aço Galvanizado	Aço Inox
1	35	59,46 a	6,27 b
2	70	38,43 a	0,28 b
3	105	24,76 a	3,77 a
4	140	15,53 a	7,04 a
5	175	12,12 a	2,12 a
6	210	10,24 a	1,35 a
7	245	3,69 a	1,89 a
8	280	18,09 a	0,37 a
9	315	13,23 a	1,65 a
10	350	22,0 a	0,84 b

Legenda: Valores seguidos de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade estatística.

Fonte: da autora (2021).

Rodrigues, Lima e Thebaldi (2020) constataram um comportamento parecido em seu trabalho, em que os autores observaram para o período de simulação, uma taxa de penetração da corrosão final do aço galvanizado inferior à inicial, o que ocorreu devido à intensificação da camada de óxido de Zinco e à adsorção dos produtos de corrosão sobre a superfície metálica. Foi constatado ainda, que as amostras submetidas às soluções que continham maiores concentrações de fertilizante, apresentaram menores taxas de penetração da corrosão. Os autores inferem que esse fenômeno ocorre, porque a camada passivadora tende a ser formada mais rapidamente quanto maior for a concentração do fertilizante.

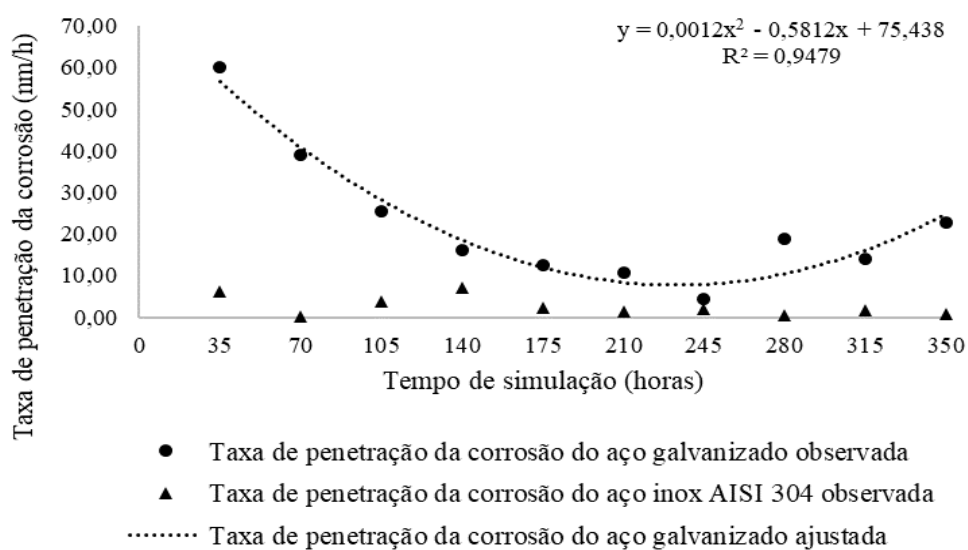
O aço inox apresentou grande oscilação entre acréscimo e decréscimo dos valores médios para a taxa de penetração da corrosão, o que sugere que a camada passivadora desse material tenha se rompido e formado novamente mais vezes que a do aço galvanizado. Apesar dessa oscilação entre passivação e depassivação, as médias apresentaram valores próximos e muito inferiores a do outro metal.

Também foram observadas variações entre as taxas de penetração média para o mesmo material nos estudos de Diniz, Monnerat e Guedes (2016). Esses autores avaliaram os efeitos corrosivos de meios salinos e ácidos em corpos de prova de aço inox AISI 304 e Hardox 600 e constataram o acréscimo e decréscimo dos valores médios da taxa para ambos os materiais, sendo o aço inox o metal com menor taxa de penetração.

Na Figura 18, pode ser visualizado o desdobramento do fator “tempo” dentro de cada nível do fator “aço” e evidencia os fatos discutidos para o desdobramento inverso. Para esse

desdobramento, verificaram-se diferenças significativas somente para o aço galvanizado, sendo este efeito melhor descrito por uma função quadrática, com coeficiente de determinação igual a 94,79%. Sugere-se, para ambos os materiais, que o aumento da taxa de penetração da corrosão se deva à despassivação e solubilização dos produtos de corrosão; e a diminuição, à repassivação com provável adsorção dos produtos de corrosão.

Figura 18 – Efeito do tempo de exposição dentro do fator aço na taxa de penetração da corrosão.



Fonte: da autora (2021).

5.2.3 Perda de espessura acumulada

A predição da perda de espessura média do aço inox AISI 304 e do aço galvanizado, quando utilizados em sistemas de irrigação via pivô-central, pode ser vista na Tabela 14. Nota-se grande proximidade entre os valores obtidos pelos três meios para a perda de espessura média anual do aço inox, sendo a solução de Cloreto de Potássio branco a que gerou menor média. Sugere-se que a maior agressividade dessa solução tenha possibilitado uma maior adsorção dos produtos de corrosão sobre a superfície metálica e a formação de uma camada passivadora mais espessa em relação às demais, o que contribuiu para que o material fosse menos atacado pela corrosão. Estima-se que após 10 anos de operação, a perda de espessura dos sistemas de irrigação via pivô-central, constituídos por aço inox AISI 304, seria aproximadamente igual a 9,98 μm .

Tabela 14 – Simulação da perda de espessura média de materiais de aço galvanizado e inox AISI 304 utilizados em sistemas de irrigação via pivô central em 10 anos de operação submetidos a soluções de água, Cloreto de Potássio branco (KCl) e Ureia.

Perda de espessura média em 10 anos (μm)					
Aço galvanizado			Aço inox		
Água	KCl	Ureia	Água	KCl	Ureia
135,37	139,96	136,03	9,99	9,78	10,18

Legenda: Para a solução de água, 10 anos de operação equivalem a 7350 horas de irrigação. Para as demais soluções, 10 anos de operação equivalem a 350 horas de fertirrigação e 7000 horas de irrigação.
Fonte: da autora (2021).

O aço galvanizado também apresentou certa proximidade entre os valores obtidos, entretanto esses ficaram mais distantes do que os observados para o aço inox AISI 304. Nota-se, na Tabela 14, que a magnitude dos valores encontrados para a perda de espessura acumulada desse material, seguiu a expressividade das médias obtidas para a perda de massa por área (TABELA 9) e para a taxa de penetração da corrosão (TABELA 12) do mesmo. Percebe-se ainda, que a perda de espessura do aço galvanizado é superior à do aço inox, o que corrobora com os resultados obtidos anteriormente.

Rodrigues (2019), ao estudar sobre os efeitos da fertirrigação sobre corrosão em aço galvanizado utilizado em pivô central, também notou proximidade entre os valores obtidos para a predição da perda de espessura metálica dos sistemas de irrigação em que é praticada apenas a irrigação e nos que alternam entre irrigação e fertirrigação com fertilizante 20-00-20 em diferentes concentrações.

O mesmo autor, baseando-se na taxa de penetração da corrosão, calculou o tempo médio necessário para que a camada de Zinco que protege o aço galvanizado fosse totalmente corroída e o aço base abaixo dessa, exposto. De acordo com Rodrigues (2020), essa seria uma forma conservadora de se estimar a vida de uma peça de aço galvanizado. Nesse sentido, o autor considerou que o revestimento de Zinco das tubulações destinadas à irrigação possuem uma espessura média próxima a 90 μm (DELLA ROVERE et al., 2013) e constatou, para as tubulações submetidas a 735 horas anuais de irrigação, que as mesmas seriam corroídas após 7,05 anos de operação. Já nos sistemas em que são praticadas, anualmente, 700 horas de irrigação e 35 horas de fertirrigação com fertilizante 20-00-20, nas concentrações de 5 g L⁻¹ e 10 g L⁻¹, após 6,99 e 7,03 anos de operação. A partir dos anos descritos, seria iniciada, então, a corrosão do metal base, o que, de acordo com o autor, é difícil de ser estimada e acontece a uma menor taxa que a corrosão do revestimento de Zinco.

Neste trabalho, adotando mesma espessura de revestimento de Zinco e a perda de espessura média causada por cada solução (TABELA 14), foi estimado, para o mesmo sistema de irrigação e tempo de operação, que a camada de zinco das tubulações de aço galvanizado, expostas à solução de água, Ureia e Cloreto de Potássio branco seriam totalmente corroídas após e respectivamente, 6,65; 6,62 e 6,43 anos de operação. Portanto, embora exista proximidade entre os valores obtidos para os sistemas de irrigação via pivô-central que praticam e que não praticam fertirrigação, estima-se que a vida útil dos que praticam seja ligeiramente inferior.

De acordo com essas estimativas e em concordância com Rodrigues (2019), seria interessante que o revestimento de Zinco nas tubulações destinadas à irrigação apresentassem pelo menos o dobro de espessura (180 μm) para que assim fosse possível assegurar uma maior proteção do metal base e, conseqüentemente, do sistema de irrigação. Isso porque a corrosão e conseqüente troca desses materiais, causa transtornos financeiros e contratempos, além de possível stress e danificações às culturas, o que pode afetar a produção agrícola.

A passivação do aço inox não acontece devido ao revestimento da superfície metálica com outro metal ou substância e, sim, devido às concentrações significativas de Cromo em sua composição química (GENTIL, 2007). Sendo assim, diferentemente do aço galvanizado, a camada protetora não irá se desgastar ao longo dos anos, expondo alguma base metálica menos nobre e tendo sua corrosão acentuada a partir daí.

Considerando que uma das maneiras de depassivação do aço inox acontece quando o material está exposto a meios ácidos (GENTIL, 2011; MAIA et al., 2015) e que as soluções estudadas se enquadram como neutras ou alcalinas (FIGURA 8), é possível inferir que esse fato não teria contribuído para ruptura da camada passivadora desse material. Carbó (2008) pesquisou sobre o pH de depassivação de diferentes tipos de aços inoxidáveis e constatou que, para o aço inox AISI 304, esse fenômeno acontece somente quando em valores abaixo de 2,5. Semelhantemente, Di Cunto (2005) constatou que a depassivação do inox, devido ao pH do meio, ocorre em valores menores que 1,7. Esses estudos sustentam que o valor de pH das soluções avaliadas neste trabalho não causou aceleração da corrosão. Infere-se que esse parâmetro também não ocasionou a aceleração da corrosão sobre o aço galvanizado. De acordo com Gentil (2011), pH com valores entre 6 e 9 não apresentam caráter corrosivo para esse material. Rodrigues et al. (2019) conduziram seu experimento em meios de pH com valores entre 6,19 e 7,0 e constataram que esse parâmetro não influenciou a corrosão do aço galvanizado.

Para fins comparativos entre os aços estudados, considerou-se uma peça metálica de aço inox AISI 304 com mesma espessura que a camada de Zinco presente nas tubulações de irrigação, 90 μm , e assim, foi estimado que a vida das peças de inox expostas à solução de água, Ureia e

Cloreto de Potássio branco, pelo mesmo período de tempo e sob as mesmas condições de operação, seria igual a 88,43; 90,05 e 91,98 anos, respectivamente, tempo superior ao estimado para o aço galvanizado.

Ressalta-se novamente em conformidade com Rodrigues (2019), que as condições nas quais esse experimento foi conduzido, podem subestimar os valores reais da corrosão metálica em sistemas de irrigação via pivô-central. Isso acontece, principalmente, porque a experimentação foi conduzida com fluido em meio estático e, nos sistemas de irrigação via pivô-central, as soluções escoam sobre pressão e velocidade média de 0,2 a 6,0 m/s, o que, de acordo com Gentil (2019), podem acelerar a corrosão. Salienta-se que a recirculação das soluções nos tanques foi feita apenas com o intuito de homogeneizar as soluções, mas a velocidade teria sido menor que o intervalo de valores mencionados.

Além disso, as amostras foram imersas em ambiente urbano, dentro de laboratório, enquanto a grande maioria dos sistemas de irrigação se encontram em campos abertos de zonas rurais. Rodrigues (2019) explica que os raios solares que incidem sobre a tubulação podem aumentar a temperatura da solução em escoamento e podem acelerar a corrosão (GENTIL, 2007). Há ainda de se considerar que a parte externa da tubulação em contato com a atmosfera estará sujeita à corrosão devido à umidade e partículas presente no ar, o que pode contribuir ainda mais para a redução da vida útil dos metais (ROGERGE, 2008; RODRIGUES 2019).

Como este experimento foi conduzido sob temperatura ambiente relativamente baixa (FIGURA 10), infere-se que a temperatura não tenha exercido influência relevante sobre a corrosão dos aços estudados. De acordo com Gentil (2011), a faixa de temperatura capaz de acentuar a corrosão em materiais de aço galvanizado está entre 65 e 75 °C, valores acima dos aqui apresentados. Joia et al. (2002), avaliando os efeitos da corrosão em diferentes tipos de aço em contato com meio aquosos de CO₂, constataram que valores de temperatura abaixo de 80 °C não influenciam a corrosão dos aços inoxidáveis.

Os resultados aqui obtidos são válidos para as condições de operação simuladas e soluções analisadas.

5. CONCLUSÕES

- a) As mudanças da fonte de fertilizante utilizada, bem como a variação das condições de operação do sistema, influenciam no comportamento da corrosão;
- b) Para o aço galvanizado, quanto maior a condutividade elétrica da solução, maior a perda de massa por área e maior a taxa de penetração da corrosão; para o aço inox AISI 304, quanto maior a condutividade, menor a perda de massa por área, estando a taxa de penetração em função da condutividade elétrica do meio aquoso e do ganho ou perda de massa do sistema. O aço inox AISI 304 é substancialmente mais resistente à corrosão do que o aço galvanizado;
- c) A vida útil dos materiais de aço galvanizado e aço inox AISI 304 utilizados em sistemas de irrigação, que praticam a fertirrigação com soluções de Ureia (10g L^{-1}) ou Cloreto de Potássio (10g L^{-1}), praticamente não se difere do tempo de vida dos mesmos materiais utilizados em sistemas de irrigação que apenas irrigam com água similar à água utilizada neste experimento;
- d) A espessura da camada de Zinco utilizada em tubulações de aço galvanizado destinadas a irrigação deveria ser de, no mínimo, $180\ \mu\text{m}$, valor correspondente ao dobro do valor atual, para garantir maior longevidade dos sistemas de irrigação constituídos por esse material.

REFÊRENCIAS

ALEMAN, C. C.; CHAVES, T. C. Efeito da adubação nitrogenada via fertirrigação em capim limão. **Nucleus**, v. 13, n. 1, p. 199–204, 2016.

ALMEIDA, C. V. B. DE; SILVA, M. P. N. M. DA. **Análise da influência dos agentes químicos na corrosão do filtro biológico percolador de estações de tratamento de esgoto**. 2017. 72 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

ALMUAILI, F. A. et al. Strain-induced Reactivation of Corrosion Pits in Austenitic Stainless Steel. **Corrosion Science**, v. 125, p. 12–19, 2017.

ALVAREZ-BASTIDA, C. et al. Drinking water characterization and removal of manganese. Removal of manganese from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 6, n. 2, p. 2119-2125, 2018.

ALVES, D. R. B.; KLAR, A. E. Efeito de adubação nitrogenada via fertirrigação e aplicação de forma convencional na produção de alface (*Lactuca sativa* L.) em estufa. **Irriga - Botucatu**, v. 2, p. 76–89, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 1-03**: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 31-72**: Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. West Conshohocken, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12212**: Projeto de Poço para captação de Água Subterrânea, Rio de Janeiro, 1992.

BOAS, R. L. V. et al. Fertirrigação para iniciantes. **Pesquisa & tecnologia**, São Paulo, v. 3, n. 2, 2006.

BORGES, A. L.; SILVA, D. J. Fertilizantes para fertirrigação. In: SOUSA, V. F. et al. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. cap. 7, p. 254-264.

BRAGA, G. N. M. **As Vantagens da Fertirrigação**. Na sala com Gismonti, Abril, 2010. Disponível em: <<https://agronomiacomgismonti.blogspot.com/2010/04/as-vantagens-da-fertirrigacao.html>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 10 dez. 2013.

BRASIL. Ministério da Saude. Portaria n° 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria da Consolidação GM/MS n°5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário oficial da união**, Brasília, DF, 07 maio 2021.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.

CANTARINO, S. DE J. **Estudo da corrosão dos aços AISI 1010 e AISI 316L em soluções com elevado teor de cloreto e em ácido naftênico**. 2014. 102 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. ArcelorMittal, 2008.

CECAGNO, D. et al. Soil acidification under long-term nitrogen fertilization in a native pasture with ryegrass introduction. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 2, p. 263–267, 2019.

CHENG, C. Q. et al. Pitting corrosion of sensitised type 304 stainless steel under wet–dry cycling condition. **Corrosion Science**, v. 118, p. 217–226, 2017.

COELHO, E. F. et al. Fertirrigação. In: **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte: Epamig, v. 31, n. 259, p. 58–70, 2010.

COELHO, G.; SILVA, A. M. DA. O efeito da época de irrigação e de parcelamentos de adubação sobre a produtividade do cafeeiro em três safras consecutivas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 2, p. 400–408, 2005.

COSTA, E. F.; BRITO, R. A. L. **Aplicador portátil de produtos químicos via água de irrigação**. Sete Lagoas, MG: Emprapa, 1998 (Circular técnica 13).

COSTA, R. S. **Estudo da corrosão do aço inox AISI 304 em álcool etílico hidratado combustível**. 2012. 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

CUNHA, F. N. et al. Uniformidade De Irrigação Por Gotejamento Sob Fertirrigação Com Fontes De Nitrogênio. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 7, p. 3118–3128, 2019.

CUNHA, L. G. S. **Cenários e desafios da indústria de fertilizantes**. 2017. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Univesidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

DALRI, A. B. et al. Fertirrigação com vinhaça concentrada no desenvolvimento da alface. **Revista Agrogeoambiental**, v. 6, n. 2, p. 93–100, 2014.

DELAUNOIS, F.; TOSAR, F.; VITRY, V. Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems. **Bioelectrochemistry**, v. 97, p. 110–119, 2014.

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.

DI CUNTO, J. C. **Estudo da resistência à corrosão de aços inoxidáveis para uso na parte fria dos sistemas de exaustão de veículos**. 2005. 105 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2005.

DIAS, F. M. S.; CÂNDIDO, L. C. Efeito da acidez na estabilidade da camada passiva de aços inoxidáveis em soluções contendo íons cloretos. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 4, p. 43–46, 2008. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br/portal-tecnologico/portal/revista_tecnologia/resumo.asp?cd=261>. Acesso em: 07 jan. 2021.

DINIZ, Á.; MONNERAT, C. S.; GUEDES, F. N. D. J. Estudo do efeito corrosivo dos aços inox AISI 304 e microligado Hardox 600 em meios salino e ácido. **Revista Eletrônica Engenharia de Interesse Social**, v. 1, n. 1, 2016.

DOLABELLA, L. DE M. P. **Estudo eletroquímico sobre a corrosão de aço carbono e aço inoxidável em meio contendo cloreto na presença de extrato etanólico de própolis**. 2016. 140 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.

EKER, B.; YUKSEL, E. Solutions to corrosion caused by agricultural chemicals. **Trakia Journal of Science**, v. 3, n. 7, p. 1–6, 2005.

EMBRAPA. **Revisão de literatura**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento On-line, 2007. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp50_4.htm>.

FAZAL, M. A.; HASEEB, A. S. M. A.; MASJUKI, H. H. Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 10, p. 1308–1315, 2010.

FERNANDES, G. M. N. **A importância econômica da irrigação para a agricultura no estado de Goiás**. 2019. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Agronomia) - Centro Universitário de Goiás Uni-Anhanguera, Goiânia, 2019.

FERREIRA, D. F. **Sisvar: a guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons**, 2014.

FINAMORE, D. J. **Avaliação da corrosão uniforme e puntiforme em meio aquoso aerado utilizando a técnica de cupons de perda de massa**. 2016. 119 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goyatacazes, RJ, 2016.

FONSECA, E. DA S. et al. Estudo do comportamento do aço A-36 em meios contendo íons cloreto e íons sulfatos. **Revista Univap**, v. 26, n. 51, p. 181–190, 2020.

FONTENELLE, T. H. et al. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. 2 ed.rev.atual. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo (ALICE), 2019.

FRANCO, J. A. M.; SARAIVA NETO, A. Produção de fertilizantes nitrogenados e suprimentos de matéria prima. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTIR, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007. Cap. 03, p. 73–108.

FRATONI, M. M. J. et al. Fertirrigação por gotejamento com doses de K na fase reprodutiva do tomateiro tipo Italiano. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 1, p. 110–113, 2016.

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

GARCEZ, A. L. **Determinação da perda de carga em tubulações aéreas de pivôs centrais de irrigação**. 2017. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2017.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2007.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2011.

HU, J. et al. Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switching strategy. **Water Research**, v. 129, p. 428-435, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Consulta de dados da Estação Convencional: Lavras (MG)**. 2021. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/%0A>>. Acesso em: 18 jan. 2021.

JINLONG, L.; MENG, Y.; TONGXIANG, L. The effect of surface enriched chromium and grain refinement by ball milling on corrosion resistance of 316L stainless steel. **Materials Research Bulletin**, v. 91, p. 91–97, 2017.

JOIA, C. J. B. M et al. Corrosão pelo co2 em meios aquosos de aço carbono, aço baixa liga com 1% de cr e aço inoxidável 13% cr aço inoxidável 13%cr-5%ni-2%Mo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 22., 2002, Salvador – Bahia.

LIMA, A. S. F. et al. Efeitos da fertilização nos teores de micronutrientes em eucalipto em segunda rotação Fertilization. **Ciencia, Tecnologia & Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 8–14, 2017.

LOPES, A. C. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1998.

LOPES, A. S.; BASTOS, A. R. R.; DAHER, E. Uso eficiente dos fertilizantes nitrogenados e sulfatados na agricultura brasileira: Uma visão do futuro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007. cap. 5, p. 161–187.

MAÇANEIRO, M. et al. Ensaio de corrosão de longa duração de metais expostos ao ambiente das estações de tratamento de esgoto. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, v. 5, n. 1, 2018.

MAIA, D. J. et al. Experimento sobre a Influência do pH na Corrosão do Ferro. **Química nova**, v. 37, n. 1, p. 71–75, 2015.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2009.

MARIANO, N. A. et al. Avaliação da resistência à corrosão em aço inoxidável martensítico do tipo Cr-Ni em meio marinho sintético simulando atividades em águas profundas. **Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 1, p. 135–139, 2006.

MERÇON, F.; GUIMARÃES, P. I.; MAINIER, F. B. Sistemas experimentais para o estudo da corrosão em metais. **Química Nova na Escola**, v. 33, n. 1, p. 57–60, 2011.

MORAES, G. S. et al. Entupimento de gotejadores com aplicação de nitrogênio. In: IV CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 2017.

MOTA, E. P. DA. **Dinâmica do nitrogênio em função da adubação nitrogenada com ureia Edson Pereira da Mota Piracicaba**. 2017. 134 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2017.

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

NUNES, L. P. **Fundamentos de Resistência à Corrosão**. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

OLIVEIRA, R. M. DE et al. PROMAI - Programa para manejo da irrigação. In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL – ISSN: 1984-9249, 2019, Vitória, ES. 8 a 11 de out. 2019.

OLIVEIRA, F. A. et al. Nutrição mineral do pimentão submetido a diferentes manejos de fertirrigação. **Horticultura Brasileira**, v. 33, n. 2, p. 216–223, 2015.

ORRICO, A. C. A. et al. Desempenho e características dos dejetos produzidos por cabritos em diferentes idades e alimentados com diferentes proporções entre volumoso e concentrado. **Revista Agrarian**, v. 4, n. 2010, p. 222–227, 2011.

OSTROSKI, V. C. Avaliação da velocidade de corrosão nos equipamentos portuários. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 848–880, 2019.

OTTO, R. et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw. **Revista Ciencia Agrônoma**, v. 48, n. 3, p. 413–418, 2017.

PEREIRA, A. P. **Resistência à corrosão de aços austeníticos utilizados em meio a glicerina ácida em uma planta de produção de biodiesel**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

PEREIRA, K. T. O. et al. Qualidade de mudas de moringa sob diferentes níveis de nutrientes aplicados via fertirrigação. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 497-504, 2016.

PEREZ, J. L. **Investigação da qualidade e da estabilização química da água distribuída na cidade de Brodowski-SP**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, SP, 2011.

PERFEITO, D. G. DE A. et al. Caracterização pós-colheita de milho doce submetido ao parcelamento de fertirrigação nitrogenada. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, 2017.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001.

RECLA, F. M. **Caracterização de escoamento em teste de corrosão-erosão utilizando eletrodo disco rotatório através de CFD**. 2013. 57 p. Projeto de Graduação (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu Uso Eficiente**. São Paulo: ANDA, 2017. (Lopes AS, tradutor).

REISSER JUNIOR, C. Fertirrigação água e nutrição na mesma operação. **Embrapa Clima Temperado - Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2019.

ROBERGE, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. McGraw-Hill, 2011.

ROBERGE, P. R. **Corrosion engineering: principles and practice**. McGraw-Hill, 2008.

ROCHA, C. T. D. DA; CHRISTOFIDIS, D. Vantagens da opção pela agricultura irrigada. **Revista de política agrícola**, v. 24, n. 2, p. 17–25, 2015.

RODRIGUES, K. V. **Efeitos da fertirrigação sobre corrosão em aço galvanizado utilizado em pivô central**. 2019. 56 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

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.

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.

ROSSI, C. G. F. T. **Inibição à corrosão do aço AISI 1020, em meios ácido e salino, por tensoativos e substâncias nitrogenadas microemulsão**. 2007. 162 p. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2007.

SHEN, W. et al. Preparation and characterization of 304 stainless steel / Q235 carbon steel composite material. **Results in Physics**, v.7, p. 529-534, 2017.

SHREYAS, P.; PANDA, B.; VISHWANATHA, A. D. Characteristics of stainless steel-galvanized steel joint : Effect of stainless steel composition and welding parameters. **Materials Today: Proceedings**, v. 19, n. 2, p. 468–473, 2019.

SILVA, D. J.; FEITOSA FILHO, J. C. Fertirrigação para iniciantes. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE FERTIRRIGAÇÃO, 1; MOSTRA DE EQUIPAMENTOS E PRODUTOS UTILIZADOS NA IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO, 1., 2003, João Pessoa. Anais. João Pessoa: UFPB; Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2003., 2003.

SILVA, J. D.; BORGES, A. L. Fertilizantes para fertirrigação. In: BORGES, A. L. et al. **Fertirrigação em Fruteiras Tropicais**. 2. ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009. cap. 02, p. 20-37.

SILVA, P. F. da, **Introdução à Corrosão e Proteção das Superfícies Metálicas**. 1. ed. Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, 1981.

SOUSA, V. F. et al. Manejo da fertirrigação em fruteiras e hortaliças. In: SOUSA, V. F. et al.. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. cap. 10, p. 317–338.

SOUSA, V. F.; PINTO, J. M.; COELHO, E. F. Manejo da fertirrigação. In: BORGES, A. L. et al. **Fertirrigação em Fruteiras Tropicais**. 2. ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009. cap. 04, p. 61-73.

SOUZA, L. B. O. DE. **Avaliação eletroquímica do mecanismo de corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos aisi 304 e aisi 316 em meio salino**. 2019. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2019.

SUNNY, A. C.; HAKKIM, V. M. A. Automated and non-automated fertigation systems inside the polyhouse - A comparative evaluation. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 5, p 2328-2335, 2017.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. **Engenharia de Irrigação: Tubos e Acessórios**. 1. ed. Campinas, SP: Unicamp/ Faculdade de Engenharia Agrícola, 2015.

TRANI, P. E.; TIVELLI, S. W.; CARRIJO, O. A. **Fertirrigação em hortaliças**. 2. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 2011. 51 p. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 196).

VASCONCELOS, J. S. DE; BROSEGUINI, M. **Estudo de caso corrosão em tubulação de aço carbono provocada por água doce**. 2013. 53 p. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

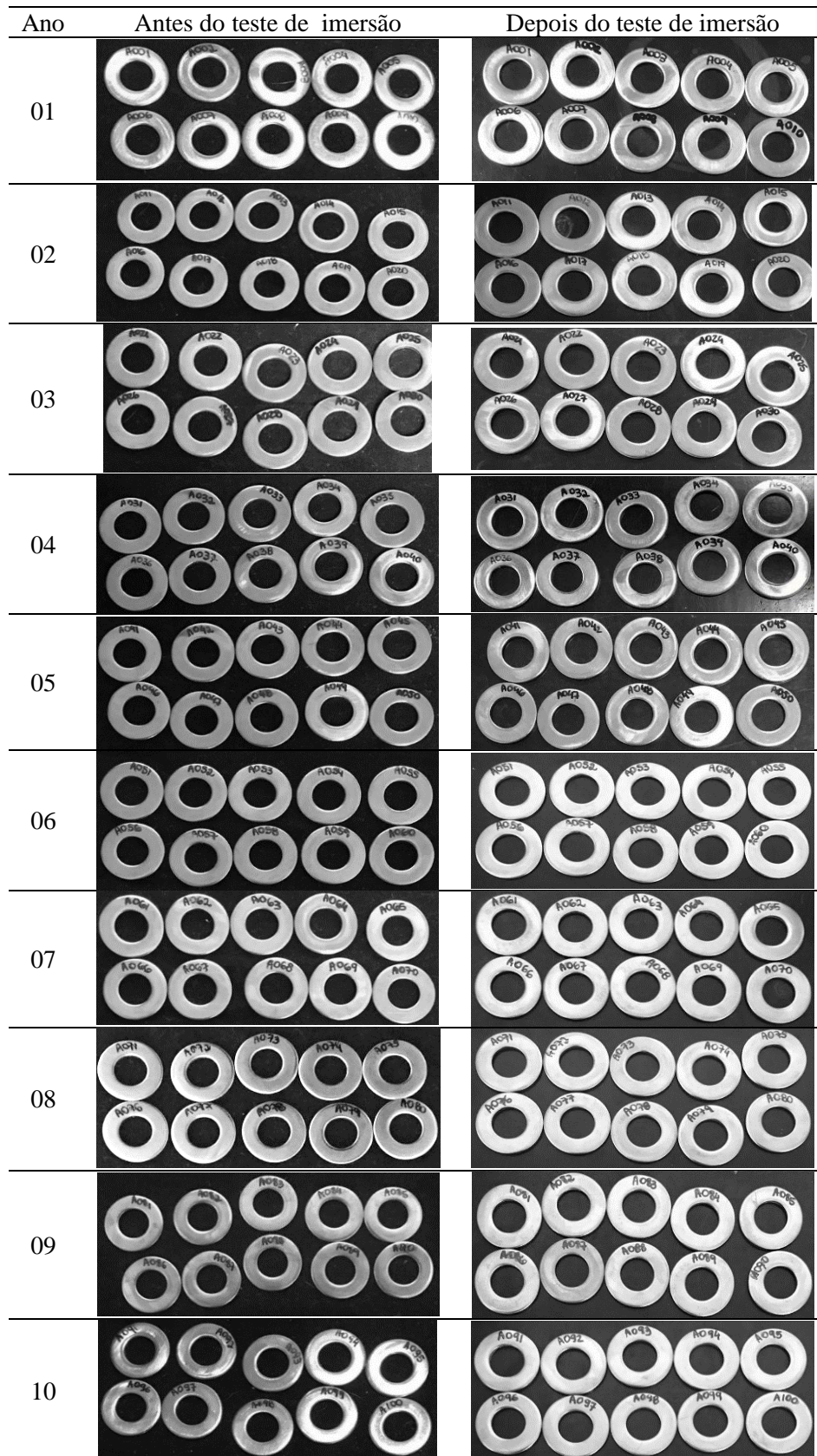
VAZ, E. L. S.; ACCIARI, H. A.; CODARO, E. N. Um método para avaliar a taxa de corrosão. **Química nova**, v. 34, n. 7, p. 1288–1290, 2011.

VINTURINI, M. **Corrosão galvânica em estruturas metálicas de sistemas fotovoltaicos**. Canal Solar, Dez. 2019. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/corrosao-galvanica-em-estruturas-metalicas/>>. Acesso em: 02 jan. 2021.

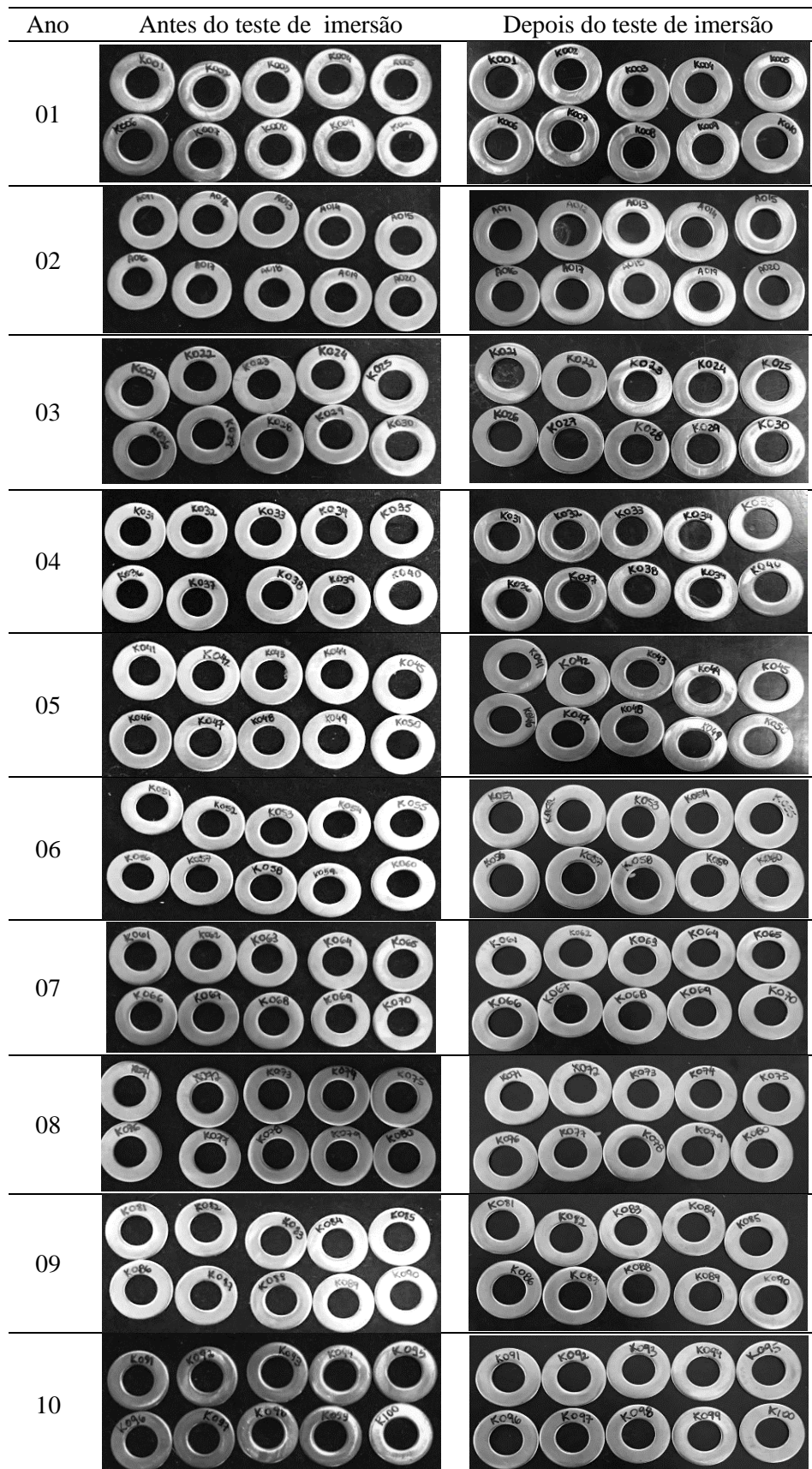
VITTI, G. C.; BOARETTO, A. E.; PENTEADO, S. R. Fontes de fertilizante e fertirrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE FERTILIZANTES FLUÍDOS, 1993, Anais... Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p. 261-280.

ZERIHUN, D. et al. Irrigation & Drainage Systems Engineering Fertigation Uniformity under Sprinkler Irrigation : Evaluation and Analysis. **Irrigation Drainage Systems Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1–13, 2017.

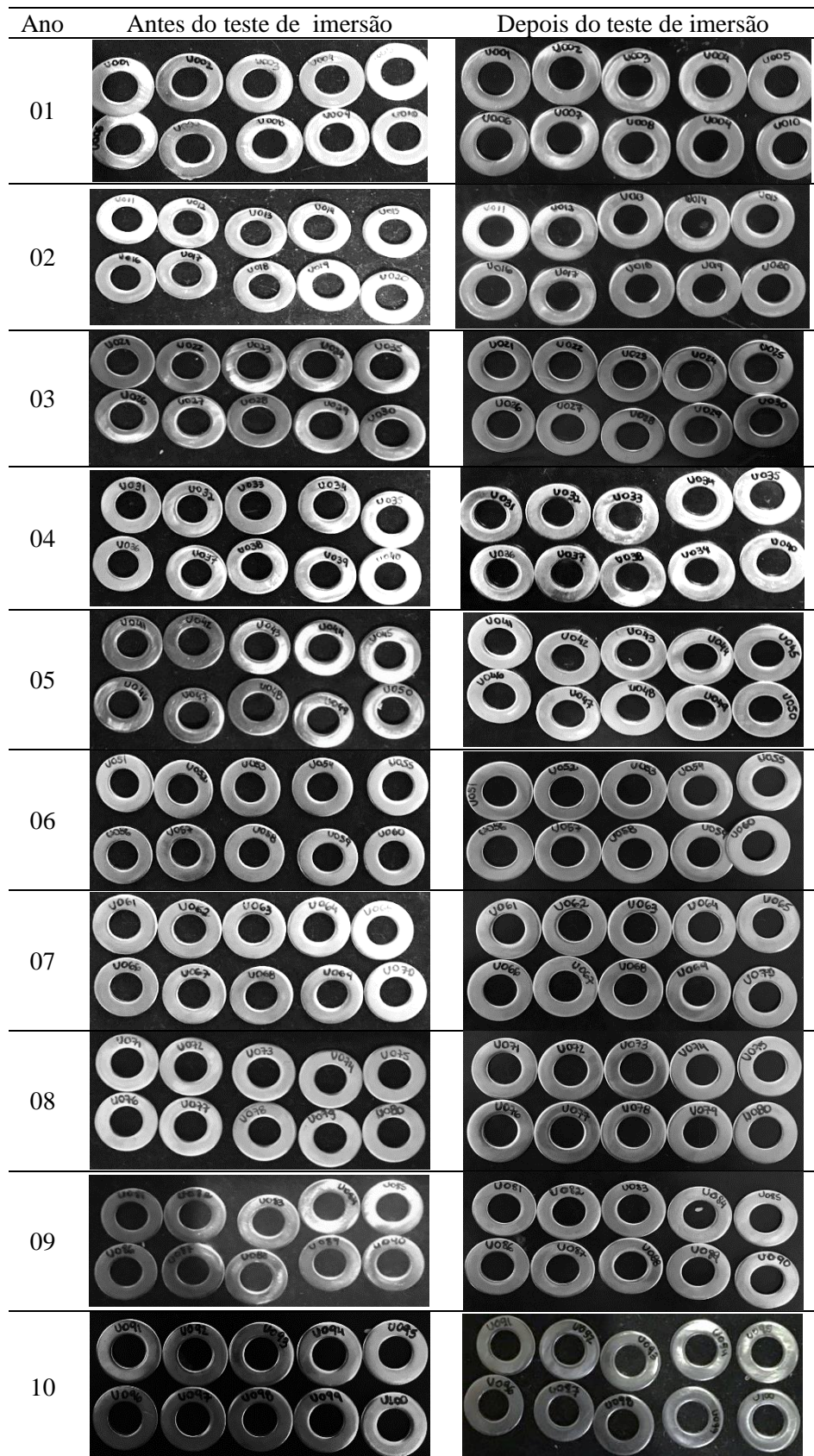
APÊNDICE A – Corpos de prova de aço inox expostos à solução contendo água.



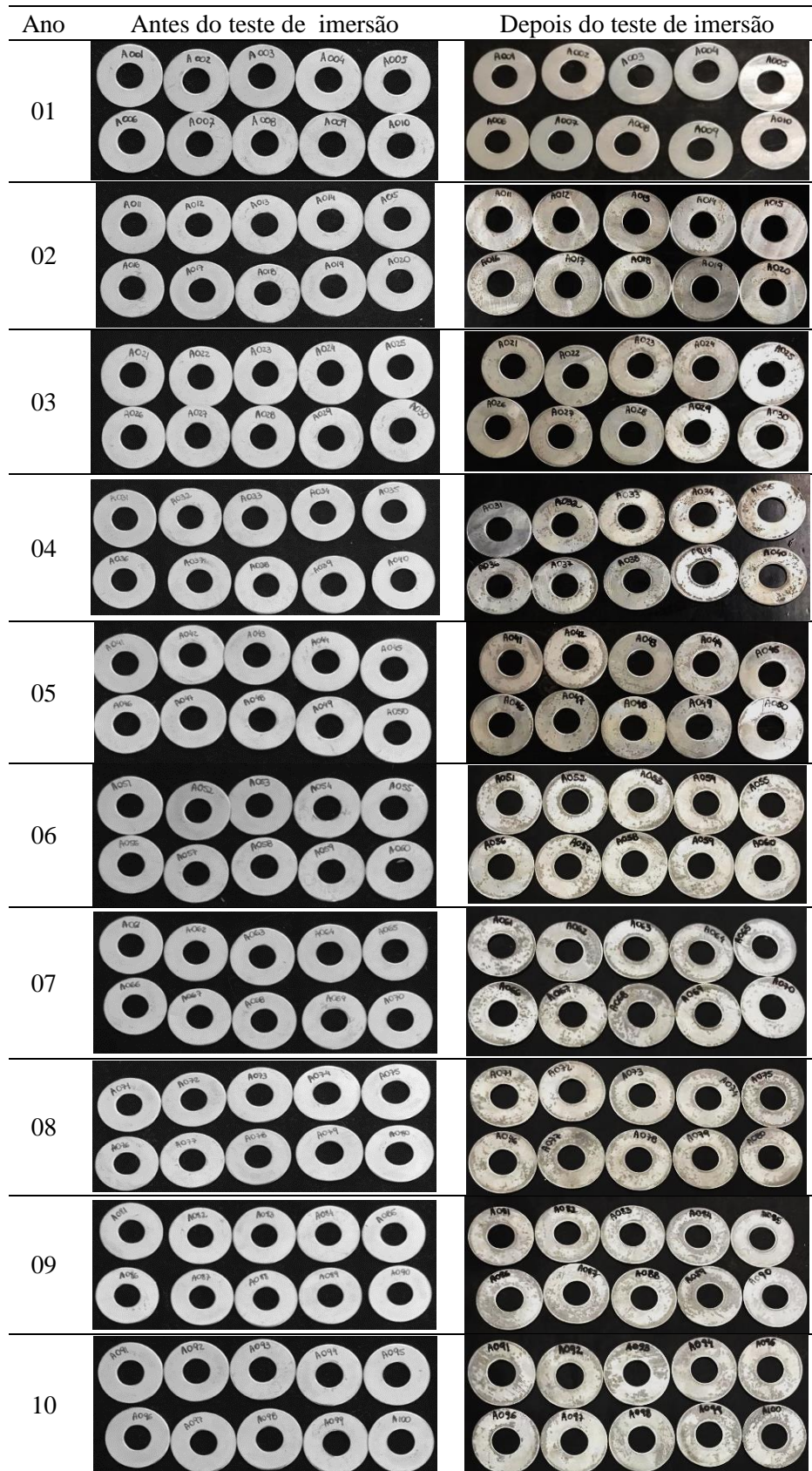
APÊNDICE B – Corpos de prova de aço inox expostos à solução contendo Cloreto de Potássio branco e água, 10 g L⁻¹.



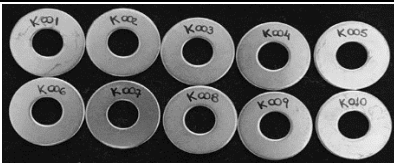

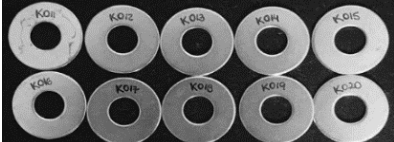

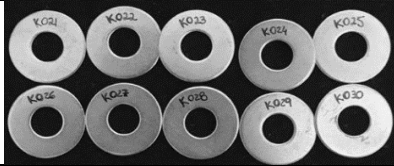

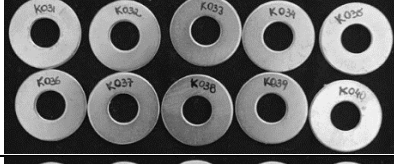

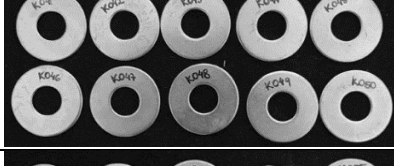

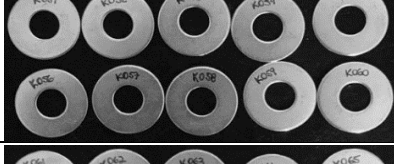

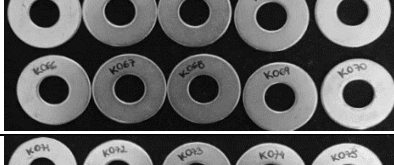

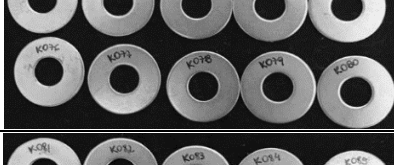

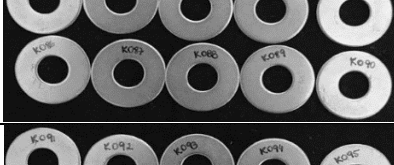

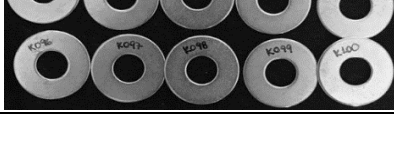

APÊNDICE C – Corpos de prova de aço inox expostos à solução contendo Ureia e água, 10 g L⁻¹.



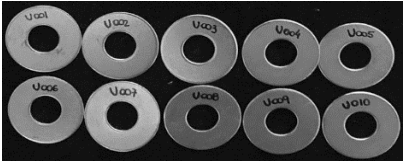

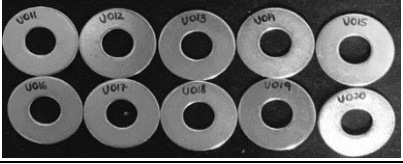

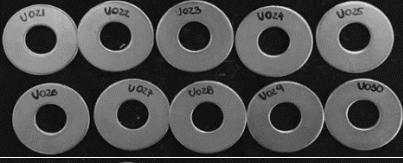

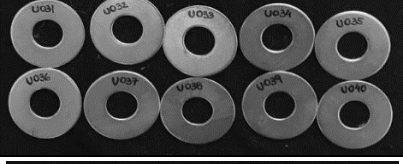

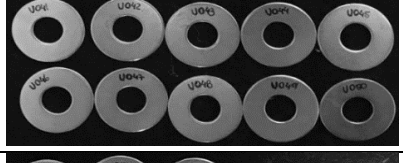

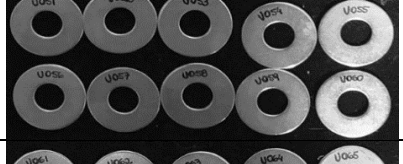

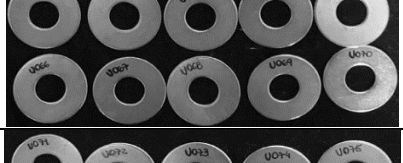

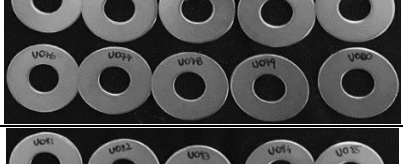

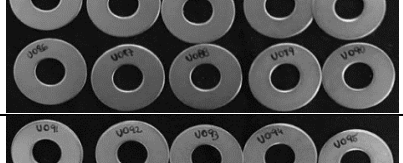

APÊNDICE D – Corpos de prova de aço galvanizado expostos à solução contendo água.



APÊNDICE E – Corpos de prova de aço galvanizado expostos à solução contendo Cloreto de Potássio e água, 10 g L⁻¹

Ano	Antes do teste de imersão	Depois do teste de imersão
01		
02		
03		
04		
05		
06		
07		
08		
09		
10		

APÊNDICE F - Corpos de prova de aço galvanizado expostos à solução contendo Ureia e água, 10 g L⁻¹.

Ano	Antes do teste de imersão	Depois do teste de imersão
01		
02		
03		
04		
05		
06		
07		
08		
09		
10	