



KARINA VILELA RODRIGUES

**EFEITOS DA FERTIRRIGAÇÃO SOBRE CORROSÃO EM
AÇO GALVANIZADO UTILIZADO EM PIVÔ CENTRAL**

**LAVRAS-MG
2019**

KARINA VILELA RODRIGUES

**EFEITOS DA FERTIRRIGAÇÃO SOBRE CORROSÃO EM AÇO GALVANIZADO
UTILIZADO EM PIVÔ CENTRAL**

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

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

**LAVRAS-MG
2019**

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

Rodrigues, Karina Vilela.

Efeitos da fertirrigação sobre corrosão em aço galvanizado
utilizado em pivô central / Karina Vilela Rodrigues. - 2019.
56 p. : il.

Orientador(a): Luiz Antonio Lima.

Coorientador(a): Michael Silveira Thebaldi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2019.

Bibliografia.

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

KARINA VILELA RODRIGUES

**EFEITOS DA FERTIRRIGAÇÃO SOBRE CORROSÃO EM AÇO GALVANIZADO
UTILIZADO EM PIVÔ CENTRAL**

**EFFECTS OF FERTIRRIGATION ON CORROSION OF GALVANIZED STEEL
USED IN CENTER PIVOT**

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

APROVADA em 20 de fevereiro de 2019.

Dr. Luiz Antonio Lima UFLA

Dr. Michael Silveira Thebaldi UFLA

Dr. Carlos Henrique Lauro UFSJ

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

**LAVRAS-MG
2019**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus e à Virgem Maria, por terem me guiado até aqui.

Aos meus pais, Adriane e Heder, e à minha família pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos até o fim dessa jornada.

Aos professores Luiz Antonio Lima e Michael Silveira Thebaldi pelas orientações e disposição para ajudar.

A todos os funcionários e colegas do Departamento de Recursos Hídricos, que participaram e contribuíram direta ou indiretamente nesta pesquisa, em especial, ao Elvis Marcio de Castro Lima, pela ajuda e paciência durante o experimento.

Aos professores Adriano Valentim Diotto e Carlos Henrique Lauro pela participação e contribuição nas bancas de qualificação e defesa.

A todos os colegas pela ajuda e companheirismo nas aulas, em especial, ao Lukas e à Mariana, que se tornaram grandes amigos.

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

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Uma das principais causas de deterioração e redução da vida de equipamentos agrícolas é a corrosão. Em sistemas de irrigação do tipo pivô central a corrosão ocorre, principalmente, nas tubulações de aço galvanizado, causando problemas como a redução na eficiência de aplicação do sistema, a contaminação da água de irrigação, vazamentos e redução da vida útil do equipamento. O pivô central é um dos sistemas de irrigação mais utilizados, e possui vantagens como o uso da fertirrigação, técnica que pode aumentar a corrosão, uma vez que fertilizantes em contato com água ou umidade se tornam corrosivos. Nesta pesquisa foi avaliada a corrosão causada pela fertirrigação em corpos de prova de aço galvanizado similar ao utilizado em pivôs centrais, simulando 10 anos de fertirrigação com frequência de 5 vezes ao ano e duração de 7 horas. Para isto, foram realizados testes de imersão em soluções contendo 0, 5 e 10 g/l do fertilizante 20-00-20, a fim de obter a perda de massa por área de material metálico, a taxa de corrosão ou taxa de penetração média anual no aço galvanizado, além do efeito da fertirrigação sobre a vida do pivô central. A perda de massa por área aumentou com o tempo de exposição no meio corrosivo e com a concentração de fertilizante, a taxa de corrosão média decresceu com o tempo de exposição das amostras e, houve uma leve redução na estimativa de vida da camada de revestimento de zinco exposta ao fertilizante 20-00-20. Os resultados obtidos mostraram que a fertirrigação causa aumento da corrosão em aço galvanizado utilizado em tubulações de pivôs centrais.

Palavras-chave: Taxa de corrosão. Perda de massa. Teste de imersão.

ABSTRACT

One of the main causes of deterioration and reduction of the lifetime of agricultural equipment is corrosion. In central pivot irrigation systems, corrosion occurs mainly in galvanized steel pipes, causing problems such as reduction of water application efficiency, contamination of irrigation water, leaks and reduction of equipment lifetime. The center pivot is one of the most widely used irrigation systems because it has advantages such as the use of fertigation, which can increase corrosion, once fertilizers in contact with water or moisture become corrosive. This research evaluated the corrosion caused by fertigation in galvanized steel test specimens similar to those used in center pivots, simulating 10 years of fertigation with frequency of 5 times a year and duration of 7 hours, by means of immersion tests in solutions containing 0, 5 and 10 g/l of the fertilizer 20-00-20, in order to obtain the mass loss per area of metallic material, annual average penetration rate in steel and the effect of fertigation on the lifetime of center pivot. The mass loss per area increased with the time of exposure in the corrosive environment and with the fertilizing concentration, the average corrosion rate decreased with the exposure time and there was a slight reduction in the estimated useful life of the zinc coating layer exposed to fertilizer 20-00-20. The results obtained showed that fertigation increased corrosion in galvanized steel used in center pivot pipes.

Keywords: Corrosion rate. Mass loss. Immersion test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Formas de corrosão: a) uniforme; b) pites; c) erosão; d) cavitação.....	17
Figura 2 - Esquema do aparato experimental. a) planta; b) corte.....	25
Figura 3 - Corpos de prova de aço galvanizado. a) vista frontal; b) vista lateral; c) fotografia.	26
Figura 4 - Distribuição dos corpos de prova dentro das caixas.	27
Figura 5 - Corpos de prova antes e depois dos testes de imersão com tempo de simulação de 1 a 10 anos em soluções sem adição de fertilizante 20-00-20.....	35
Figura 6 - Corpos de prova antes e depois dos testes de imersão com tempo de simulação de 1 a 10 anos em soluções na concentração de 5 g/l de fertilizante 20-00-20.....	36
Figura 7 - Corpos de prova antes e depois dos testes de imersão com tempo de simulação de 1 a 10 anos em soluções na concentração de 10 g/l de fertilizante 20-00-20.....	37
Figura 8 - Figuras aproximadas 40x dos corpos de prova após os testes de imersão com tempo de simulação de 1 a 5 anos em soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.	39
Figura 9 - Figuras aproximadas 40x dos corpos de prova após os testes de imersão com tempo de simulação de 6 a 10 anos em soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.	40
Gráfico 1 - Condutividade elétrica das soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.	30
Gráfico 2 - pH das soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.....	31
Gráfico 3 - Temperaturas ambiente médias durante o experimento.....	32
Gráfico 4 - Efeito do tempo de exposição dos corpos de prova de aço galvanizado em soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.	42
Gráfico 5 – Efeitos do tempo de exposição dentro das diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 na perda de massa dos corpos de prova de aço galvanizado.....	43
Gráfico 6 – Efeitos do tempo de contato em solução de fertilizante 20-00-20 na taxa de corrosão de corpos de prova de aço galvanizado.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores de ações corrosivas e incrustantes.	13
Tabela 2 - Classificação da taxa de corrosão.....	20
Tabela 3 - Taxa de corrosão média em aço galvanizado.....	21
Tabela 4 - Corrosividade dos fertilizantes.....	23
Tabela 5 - Taxas de corrosão por fertilizantes em aços baixa liga e galvanizado.....	24
Tabela 6 - Dados mensais médios do controle da água de abastecimento servida na UFLA. .	29
Tabela 7 - Quadro resumo da ANOVA realizada na avaliação de perda de massa em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 e tempos de contato.	41
Tabela 8 - Comparação entre as médias da perda de massa por área em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20. .	41
Tabela 9 - Balanço da perda de massa em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 e tempos de contato.	42
Tabela 10 - Quadro resumo da ANOVA realizada na avaliação de taxa de corrosão em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 e tempos de contato.	44
Tabela 11 - Valores da taxa de corrosão em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 e tempos de contato.	46
Tabela 12 - Simulação da perda de espessura de uma tubulação de aço galvanizado utilizada em pivô central durante 10 anos de irrigação submetida a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.	48
Tabela A 1 - Média da quantidade de material metálico perdido durante o processo de limpeza.	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Sistema de irrigação por aspersão mecanizada do tipo pivô central	12
2.2	Qualidade da água	13
2.3	Fertirrigação	14
2.3.1	Fertilizantes utilizados na fertirrigação.....	15
2.4	Corrosão	15
2.5	Aço galvanizado	18
2.5.1	Corrosão em aço galvanizado	20
2.6	Corrosão em equipamentos de irrigação	22
2.6.1	Possibilidade de corrosão ou aumento da corrosão na fertirrigação.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Análise qualitativa dos corpos de prova	27
3.2	Análise quantitativa dos corpos de prova.....	27
3.3	Características da água de abastecimento.....	29
3.4	Monitoramento das soluções.....	30
3.5	Análise estatística	32
3.6	Simulação da perda de espessura em aço galvanizado utilizado em pivô central	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1	Análise Qualitativa	34
4.2	Análise Quantitativa	40
4.2.1	Perda de massa ao longo do tempo	40
4.2.2	Taxa de corrosão ao longo do tempo.....	44
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	ANEXO A	56

1 INTRODUÇÃO

A prática da irrigação tem crescido ao longo dos últimos anos, principalmente os sistemas mecanizados, que requerem pouca mão de obra e proporcionam aumento de produção. Dentre os métodos de irrigação por aspersão, o pivô central é um dos sistemas mais utilizados, devido a vantagens como a possibilidade de aplicação de fertilizantes na água de irrigação.

De acordo com um estudo feito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e Agência Nacional de Águas, o Brasil possui cerca de 20 mil pivôs centrais irrigando uma área de 1,275 milhão de hectares, com potencial para aumentar em 5 vezes a utilização desta tecnologia (EMBRAPA, 2016).

A Empresa Valley, fabricante de pivôs centrais, afirma que a expectativa de vida útil ideal para tubulações de aço galvanizado utilizadas em pivôs centrais é de cerca de 25 anos, embora existam relatos de problemas de degradação com menos de 10 anos de uso. Isso ocorre devido ao elevado número de horas de operação anual, a qualidade da água de irrigação e ao uso de fertilizantes via sistema de irrigação (VALLEY, 2016).

A prática da fertirrigação é interessante para os irrigantes por ser simples e possuir vantagens como a redução de custos com energia e adubação. Esta promove aumento de produtividade a um menor custo, quando comparada à operação convencional, fator importante para o preço final do produto que chega ao consumidor.

O processo de corrosão consiste na degradação de um material por reação com o meio onde este se encontra. A fertirrigação pode causar aumento da corrosão em tubulações de aço galvanizado, pois fertilizantes em contato com a água ou umidade se tornam corrosivos. Sendo assim, podem causar em sistemas de irrigação, principalmente no pivô central, que é constituído majoritariamente de material metálico, a redução na eficiência do equipamento, contaminação da água de irrigação, falhas em peças e no sistema de injeção de fertilizantes, vazamentos e redução na vida do sistema, gerando aumento de custos com manutenção e troca de equipamentos.

Quando a causa da corrosão é detectada, é possível controlá-la e reduzir uma parte considerável dos custos com manutenção e troca de equipamentos usando mecanismos de prevenção e tratamentos executados no dia a dia, como a limpeza, pintura e manutenções periódicas dos equipamentos e acessórios metálicos.

Mesmo sendo uma das principais causas de reposição de peças e troca de equipamentos de irrigação, a corrosão não é tratada com sua devida importância, existindo poucos estudos e falta de informação sobre as causas e as consequências deste fenômeno.

Assim, com o intuito de fornecer maiores informações sobre a corrosão causada pela fertirrigação, objetivou-se, nesta pesquisa, avaliar a corrosão em corpos de prova de aço galvanizado, similar ao utilizado em tubulações do sistema de irrigação do tipo pivô central, em contato com soluções de fertirrigação com diferentes concentrações do fertilizante 20-00-20 (20% de nitrogênio, 0% de fósforo e 20% de potássio) durante 10 anos, considerando:

- a) a perda de material por corrosão nos corpos de prova de aço galvanizado;
- b) a taxa de corrosão por perda de massa nos corpos de prova de aço galvanizado;
- c) o possível efeito da fertirrigação sobre a vida da espessura da camada do revestimento de zinco em um pivô central.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de irrigação por aspersão mecanizada do tipo pivô central

O pivô central é um dos sistemas de irrigação mais utilizados, compondo mais de 50% das áreas irrigadas por aspersão nos Estados Unidos, Brasil e Argentina (ALLEN; KELLER; MARTIN, 2000; MORENO et al., 2012). Segundo Paulino et al. (2011), representa uma parcela de aproximadamente 20% da área irrigada no Brasil.

O pivô central é composto por uma linha lateral de aço galvanizado onde são instalados os aspersores, suportada por torres que possuem rodas em sua base e são acionadas por meio de sistemas moto-redutores; tal movimentação ocorre por alinhamento e desalinhamento das torres, em que, ao se desalinharem acionam relés que, por sua vez, acionam os motores que são ligados a redutores, proporcionando o movimento circular, podendo completar parte do círculo ou o círculo completo em torno do ponto do pivô, que é fixo (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

Um sistema de irrigação do tipo pivô central varia entre 25 e 200 hectares por unidade. Podem ser fabricados diversos modelos para atender os mais variados sistemas de produção, abrangendo culturas de baixo ou alto porte e aplicação de água com molhamento total ou limitado (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

Quanto mais longe estiver a torre do ponto do pivô, mais rápido ela se move e maior a área irrigada. Por irrigar uma área circular, os cantos não recebem irrigação, devido a isto, utiliza-se um canhão no final da linha lateral para aumentar a área irrigada. Alguns pivôs possuem na extremidade um sistema designado como *corner*, capaz de irrigar os cantos. O custo desse acessório é, entretanto, elevado. Os aspersores podem possuir pressão de serviço e intensidade de aplicação crescente à medida que se distanciam do ponto do pivô, devido a diferença de velocidade das torres. O aumento da intensidade, à medida que se afasta do centro, requer de cada aspersor aplicar maiores vazões para obter a mesma lâmina de água (ROBBINS; HEERMANN; SNEED, 2011).

De acordo com Keller e Bliesner (1990), o pivô central possui vantagens como: distribuição de água simplificada, uniformidade de aplicação de água relativamente alta, e a possibilidade de aplicação de fertilizantes e outros produtos químicos por meio da água de irrigação.

2.2 Qualidade da água

Segundo Gentil (2011), a água quimicamente pura é composta de moléculas que são associadas por ligações de hidrogênio, e que, todas as outras substâncias presentes são consideradas impurezas, as quais podem ser: sais, ácidos, gases dissolvidos, partículas em suspensão e microrganismos. Portanto, deve-se adequar a água de acordo com seu tipo de destinação, a fim de evitar problemas de utilização e corrosão causadas por essas impurezas.

Algumas das propriedades químicas da água que aumentam sua corrosividade são o pH baixo, a alcalinidade e a quantidade de oxigênio dissolvido. Águas com baixas concentrações de íons de cálcio e magnésio são mais agressivas, pois elas tendem a prevenir a formação de carbonato de cálcio sobre a superfície metálica, que poderia proteger o metal contra a corrosão. Porém, se houver alta concentração desses íons, pode haver formação de precipitados químicos, ocasionando o entupimento dos emissores (COLOMBO; OLDANI; TRASATTI, 2018).

A Norma NBR 12212 proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992) aborda as condições exigidas para a elaboração de projetos de poços para captação da água subterrânea. Segundo a norma, algumas águas podem possuir ações corrosivas ou incrustantes, sendo necessário a avaliação por exame bacteriológico e análise físico-química contemplando pH, temperatura, condutividade, sólidos totais, oxigênio dissolvido, alcalinidade, dureza, gás carbônico, acidez, gás sulfídrico, cloretos, sulfatos, ferro, manganês, amônia, cor, turbidez e sólidos em suspensão. Os indicadores usuais dessas ações estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Indicadores de ações corrosivas e incrustantes.

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

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

Gentil (2011) afirma que na avaliação da ação corrosiva da água também devem ser consideradas variáveis como temperatura, velocidade e ação mecânica, visto que, temperaturas elevadas podem acelerar a corrosão e diminuir a solubilidade de gases, e que a velocidade de escoamento, geralmente, aumenta a taxa de corrosão, pois pode remover a camada de material corrosivo sobre a superfície metálica, a qual retarda o processo de corrosão.

2.3 Fertirrigação

Nos últimos anos a quimigação tem ganhado espaço, sendo que, muitos irrigantes têm aderido à prática, utilizando o sistema de irrigação para aplicação de produtos químicos. Fertirrigação é o nome dado à quimigação com fertilizantes, forma mais utilizada pelos agricultores e aplicável na maioria dos sistemas de irrigação. Embora tenha muitas vantagens, como a economia de mão de obra, redução de danos mecânicos às culturas, eficiência de uso e economia de fertilizantes, também existem as desvantagens, como a corrosão e a reação química dos fertilizantes dentro do sistema de irrigação (FRIZZONE et al., 2012).

Dos sistemas de irrigação existentes, os pressurizados são os que mais facilitam o uso de fertirrigação, em razão de que a água é aplicada e conduzida por condutos fechados sob pressão, possibilitando o melhor controle da atividade. Em sistemas de irrigação por aspersão, os que apresentam maior facilidade de aplicação são os fixos, como o pivô central, sendo altamente indicado devido sua alta potencialidade de distribuição de água, propriedade exigida para o uso da quimigação (COSTA; BRITO, 1998; FRIZZONE et al., 2012).

Segundo Sunny e Hakkim (2016), os métodos de injeção de fertilizantes mais utilizados são:

- a) injetor venturi: simples e de baixo custo, é um sistema que cria um diferencial de pressão através da água passando por uma seção estrangulada em um tubo by-pass, aumentando a velocidade do fluxo e criando uma pressão negativa capaz de succionar a solução do tanque de fertilizante, admitindo-a dentro do sistema de irrigação. Este método de injeção é comum em projetos de pequena vazão;
- b) tanque de derivação: neste sistema, parte da água da tubulação principal passa por um tanque contendo fertilizante sólido; uma redução de pressão é criada entre a entrada e saída forçada do tanque por uma válvula redutora de pressão, admitindo parte do fertilizante dentro da tubulação. Esse método não é utilizado com muita frequência, uma vez que a concentração de fertilizantes na água decresce com o tempo de aplicação;
- c) bombas injetoras: injetam a solução de fertilizante na tubulação principal; estas podem ser bombas de pistão, de diafragma, ou centrífuga. A taxa de injeção é proporcional à vazão do sistema, variando de 2 a 4% em geral.

2.3.1 Fertilizantes utilizados na fertirrigação

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

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

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

2.4 Corrosão

A corrosão é definida universalmente como a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio em que se encontra. Geralmente, ocorre em materiais metálicos (GENTIL, 2011).

De acordo com Gentil (2011), a corrosão causa incontáveis perdas econômicas em vários setores, e são classificadas em:

- a) perdas diretas: como os custos de substituição de peças ou equipamentos e custos com manutenção e procedimentos de proteção;
- b) perdas indiretas: estas são mais difíceis de equacionar, como, por exemplo, o entupimento ou perda de carga em tubulações de água e a contaminação de produtos.

A corrosão em materiais metálicos é definida como um processo eletroquímico, considerado destrutivo e não intencional, que começa geralmente na superfície. As conseqüências desse tipo de corrosão são expressivas, estimando-se que aproximadamente 5%

das receitas de uma nação industrializada sejam gastos com prevenção, manutenção ou substituição de produtos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Na corrosão eletroquímica, elétrons são cedidos em determinada região e recebidos em outra. O processo eletroquímico pode ser constituído em três etapas: o processo anódico, onde ocorre a passagem dos íons para a solução; o deslocamento dos elétrons e íons, em que elétrons das regiões anódicas se transferem para as regiões catódicas; e o processo catódico, no qual a área catódica recebe elétrons. A intensidade do processo de corrosão pode ser observada tanto pela quantidade de cargas de íons que passam do anodo para a solução quanto pela quantidade de cargas de íons que se descarregam no catodo, pois os processos anódicos e catódicos são equivalentes (GENTIL, 2011).

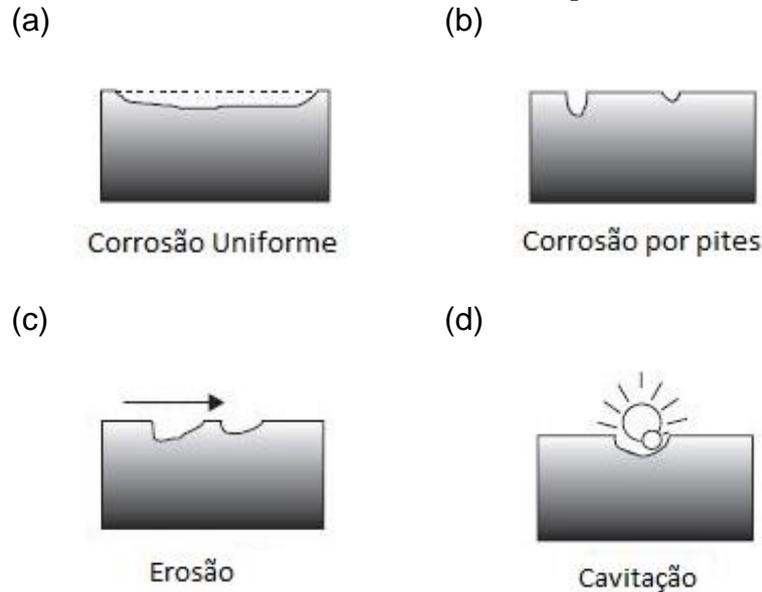
Na reação anódica ocorre a oxidação do metal; já nas reações catódicas ocorre a redução, na qual têm-se a descarga de íons de hidrogênio produzindo gás. A corrosão eletroquímica é mais intensa quando o pH é baixo, ou seja, em soluções ácidas, assim como em soluções com alta concentração de oxigênio (GENTIL, 2011; ROBERGE, 1999).

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

- a) corrosão uniforme: caracterizado pelo ataque em toda superfície metálica ou a maior parte dela de modo uniforme (Figura 1a). Esta é facilmente detectada e prevenida, tornando o número de falhas catastróficas muito pequeno;
- b) corrosão por pite (*Pitting corrosion*): é uma forma localizada de corrosão, onde são formados pequenas cavidades ou buracos no material metálico (Figura 1b). Esta é considerada mais severa que a corrosão uniforme por ser difícil de premeditar, e por ter uma capacidade muito grande de levar equipamentos a falhas mesmo com pequenos pontos de corrosão;
- c) corrosão galvânica: é uma corrosão induzida quando existem dois materiais diferentes em contato com um eletrólito corrosivo. Em que o metal menos nobre se torna o ânodo e o mais nobre o cátodo, assim o menos nobre é consumido pela corrosão. Este método também se adequa aos revestimentos, como exemplo, o revestimento de zinco em um metal a base de ferro, o zinco se torna o ânodo, pois é menos nobre, e o ferro o cátodo, conseqüentemente a camada de zinco vai ser consumida pela corrosão, e ao longo do tempo vai diminuindo sua espessura ou formando cavidades;
- d) corrosão por erosão: ocorre por efeito acumulativo de degradações causadas por atrito entre um eletrólito e uma superfície (Figura 1c). A aceleração da erosão ocorre quando existe alta velocidade de fluido e desgaste mecânico por abrasão;

- e) cavitação: é uma forma de corrosão por erosão em que partículas do fluido tem efeito corrosivo (Figura 1d). Ocorre quando a pressão do líquido em movimento atinge sua pressão de vapor, assim formando bolhas de vapor que em alta velocidade desgastam as paredes metálicas.

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



Fonte: Adaptado de Roberge (1999).

Outro tipo de corrosão recorrente é a atmosférica, causada a partir da atmosfera, que é considerada um meio corrosivo. A ação corrosiva da atmosfera depende principalmente da umidade relativa, dos particulados e gases, da temperatura e do tempo de contato do eletrólito com a superfície metálica (GENTIL, 2011).

De acordo com Roberge (2008), existem basicamente 4 tipos de corrosão atmosférica: industrial, marinha, rural e em ambientes internos, sendo a rural a menos agressiva, pois não contém grandes quantidades de contaminantes, se localizada longe de grandes centros industriais.

A variação para a atmosfera rural é basicamente entre os climas áridos ou tropicais. Os climas áridos possuem pequenos índices pluviométricos. Os climas tropicais possuem altas temperaturas, umidade relativa alta, incidência solar alta e períodos de condensação longos, gerando um ambiente mais agressivo (ROBERGE, 2008).

O fator que mais influencia a corrosão atmosférica é a umidade relativa; se esta estiver em torno de 60% o processo corrosivo é lento e acima de 70% é acelerado (GENTIL, 2011; ROBERGE, 2008).

Quando dois materiais de origem metálica e com diferentes potenciais entram em contato na presença de um eletrólito, ocorre diferença de potencial e transferência de elétrons

causando o que é conhecido como corrosão galvânica; neste caso ocorre transferência de carga elétrica de um metal para outro, podendo causar perfurações profundas no material metálico menos nobre, o qual funciona como anodo (GENTIL, 2011).

A proteção catódica é basicamente a inserção de um metal menos nobre, com maior potencial de corrosão, na estrutura metálica, em forma de pastilha ou de revestimento, para que este crie um preferencial de corrosão, atuando como o anodo de sacrifício, e o metal mais nobre se torna o catodo, sendo protegido da corrosão. Os metais mais utilizados como anodo de sacrifício são o zinco, o alumínio e o magnésio (GENTIL, 2011; ROBERGE, 2008).

2.5 Aço galvanizado

O aço galvanizado é aquele que possui uma camada protetora de zinco, chamada de revestimento, sendo utilizado predominantemente para a proteção de corrosão em meios aquosos. Atualmente, o aço galvanizado é o material mais utilizado para fabricação de tubos. Na irrigação ele é usado majoritariamente em sistemas de irrigação por pivô central, em adutoras e em conexões de sistemas de bombeamento (TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

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

É comum o emprego dos dois termos: aço zincado e aço galvanizado. Não existe diferença entre os dois, pois a zincagem é um processo de galvanização a fogo, também conhecida como zincagem por imersão a quente, logo, todo aço zincado é galvanizado. De acordo com Marder (2000), dentro da galvanização a quente existem três tipos de revestimentos de zinco:

- a) galvanizado: possui menos de 1% em peso de alumínio em sua composição;
- b) galfan: possui uma composição de 5% em peso de alumínio e 95% de zinco, podendo conter uma pequena porcentagem de magnésio;
- c) galvalume: consiste em uma composição de 55% em peso de alumínio, 43,4% de zinco e 1,6% de silício.

O processo de galvanização a quente consiste na aplicação de uma camada fina de zinco sobre a superfície do aço, formando uma camada heterogênea de diferentes fases de Fe-Zn ou Fe-Zn-Al, aumentando sua vida (SHIBLI; MEENA; REMYA, 2014).

Antes da imersão do material no banho de zinco líquido é exigida uma preparação da superfície do metal base, pois o zinco não reage com a base quando a mesma não está totalmente limpa, esta preparação consiste no desengraxe para remoção de óleos e gorduras. Em seguida, passa pela lavagem, para a remoção do desengraxante; depois pela decapagem, onde é retirada a camada oxidada, seguida de outra lavagem e, posteriormente, pelo fluxo, onde soluções de cloreto de amônia e de zinco proporcionam a uniformidade da superfície para o banho de zinco, acelerando a reação ferro-zinco (SHIBLI; MEENA; REMYA, 2014; RÊGO et al., 2011).

A próxima etapa é o banho de zinco a quente; durante este processo o metal base é imerso em uma solução contendo no mínimo 98% de zinco puro, a uma temperatura de 450 °C por aproximadamente 5 minutos, formando-se a maior parte da espessura nos primeiros instantes do banho e, em seguida, a reação é mais lenta e a camada de zinco depositada não aumenta muito (SHIBLI; MEENA; REMYA, 2014).

Segundo Gentil (2011), existem especificações para a indicação das espessuras adequadas para cada tipo de produto, estas devem ser utilizadas para evitar possíveis problemas na utilização do aço galvanizado. As técnicas mais empregadas utilizam zincagem entre 305 e 610 g/m² para obter espessuras entre 43 e 87 µm.

Na irrigação, tubos de aço galvanizado são interessantes devido suas qualidades mecânicas, facilidade de solda, alta resistência a pressões internas, diversidade de diâmetros e espessuras e capacidade de absorção de carga sem rompimento. Em contrapartida, são mais suscetíveis à corrosão e incrustação, que pioram ao longo do tempo e afetam o desempenho do sistema, são mais caros e, sem seus devidos cuidados degradam mais rápido com a ação externa quando comparados a tubulações de material plástico (TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

Contudo, o revestimento de zinco ainda é considerado a maneira mais econômica de se prevenir a corrosão em tubulações metálicas, pois protege a corrosão do aço de duas maneiras: a primeira, pela proteção que a camada de revestimento proporciona, impedindo o contato da tubulação metálica com o meio corrosivo. A segunda, por proteção galvânica, na qual ocorre o que é conhecido como anodo de sacrifício, em que o zinco é menos nobre que o ferro no meio onde estão inseridos. Um filme de óxido de zinco é formado sobre a superfície metálica ocasionando um preferencial de corrosão pelo mesmo. Ao mesmo tempo, o revestimento de zinco irá corroer a uma taxa menor que o metal base, logo, aumentando seu período de proteção (DELLA ROVERE et al., 2013; MARDER, 2000).

2.5.1 Corrosão em aço galvanizado

O aço galvanizado sofre corrosão mais severa quando o pH da água é muito ácido ou muito alcalino, portanto, é necessário que o pH da água que escoar pela tubulação esteja entre 6 e 10, para que a corrosão seja lenta, acima ou abaixo disso ela pode ser acelerada. Se houver presença de íons de cobre na água, também é possível a aceleração da corrosão, pois os íons de cobre reagem com o zinco, conseqüentemente corroendo o revestimento (GENTIL, 2011).

Segundo Gentil (2011), tubulações de aço galvanizado utilizadas em condução de água podem ser protegidas da corrosão se não houver contato com sais de cobre, limitar o pH entre 6 e 9 e evitar temperaturas entre 65 e 75 °C, pois observa-se que nesta faixa a corrosão é mais intensa, e que, o filme protetor se torna poroso e menos aderente à superfície metálica.

Quanto a resistência biológica, o aço galvanizado pode sofrer ação corrosiva por fungos ou microrganismos, principalmente quando passam longos períodos inoperantes com águas residuais em seu interior. Sua resistência química é baixa em relação aos tubos plásticos, pois quando expostos à atmosfera sofrem corrosão uniforme (TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

A taxa de corrosão, ou taxa de remoção de material como resultado da ação química, é um parâmetro de corrosão muito importante, podendo ser representada como taxa de penetração da corrosão ou perda de espessura por unidade de tempo (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

O cálculo da taxa de corrosão é um dos métodos para a determinação do comportamento da corrosão ao longo do tempo e do prazo médio de duração dos componentes que estão sujeitos aos meios corrosivos. Suzumura e Nakamura (2004), estimaram a vida de cabos de aço galvanizado por meio da taxa de corrosão em corpos de prova submetidos a diferentes meios e ressaltaram que, geralmente, o revestimento de zinco corrói primeiro e somente depois o metal base começa a sofrer corrosão.

A Norma RP-07-75 proposta pela *National Association of Corrosion Engineers* (NACE, 2013) classifica a taxa de corrosão de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da taxa de corrosão.	
Taxa de corrosão uniforme (mm/ano)	Corrosividade
< 0,025	Baixa
0,025 a 0,120	Moderada
0,130 a 0,250	Alta
> 0,250	Severa

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

Quando o aço galvanizado está em contato com águas naturais ou atmosferas normais apresentam uma vida bastante longa, porém, em contato com ambientes mais agressivos, este tempo é significativamente reduzido. Na Tabela 3 são apresentados os resultados da taxa de corrosão média em aço galvanizado em diferentes atmosferas, obtidos em um programa conduzido pelo *Subcommittee VI-ASTM Committee B-3*, por um período de 20 anos (GENTIL, 2011).

Tabela 3 - Taxa de corrosão média em aço galvanizado.

Atmosfera	Penetração média ($\mu\text{m}/\text{ano}$)
Industrial	6,3
Marinha	1,5
Rural	1,1
Árida	0,2

Fonte: Adaptado de Gentil (2011).

A redução da espessura da camada de revestimento de zinco foi calculada por perda de massa em estudos realizados por Azevedo et al. (2015). Os autores avaliaram a capacidade de formação de filme de óxido sobre a superfície metálica para diferentes revestimentos a base de zinco. Os corpos de prova foram comparados de acordo com a espessura de revestimento consumida, a qual foi obtida pela diferença entre o peso inicial das amostras e o peso após os testes com a remoção dos produtos de corrosão, procedida mergulhando as amostras em banho ultrassônico com glicina.

Diler et al. (2014) investigaram a corrosão em corpos de prova de zinco e zinco-magnésio-alumínio em atmosfera marinha a fim de verificar a influência dos íons de magnésio e alumínio na corrosão, comparando os dois tipos de materiais e seus mecanismos de corrosão. Testes de corrosão por perda de massa foram desenvolvidos para os períodos de exposição de 7 dias, 1, 3 e 6 meses. Os produtos de corrosão foram removidos com decapagem em solução de ácido crômico e lavados com água deionizada e etanol, secadas e mensuradas. Os corpos de prova de liga de zinco-magnésio-alumínio obtiveram maior resistência a corrosão, devido a composição do produto de corrosão formado na superfície metálica.

Jiang C., Wu e Jiang, X. (2018) calcularam a taxa de corrosão por perda de massa para analisar a resistência à corrosão em cabos de aço de alta resistência utilizados em pontes e, para isso foram feitos testes de corrosão acelerada em cabos de aço galvanizado com revestimento de aproximadamente 50 μm . Após o teste, os produtos de corrosão foram removidos para medir a massa final das amostras de acordo com a Norma G 1 (AMERICAN SOCIETY FOR

TESTING AND MATERIALS, 1999). Neste estudo foi constatado que a corrosão pode causar redução significativa na vida útil de cabos de aço galvanizado.

2.6 Corrosão em equipamentos de irrigação

A corrosão em um sistema de distribuição de água é um problema comum que pode gerar grandes alterações na qualidade da água do sistema em questão. São vários os fatores que podem causar a corrosão em tubulações, como o tipo do material, a idade do tubo e até a reação química da composição da água remanescente na tubulação (BIGONI et al., 2014).

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

Uma das principais causas de troca de equipamento é a corrosão, entretanto, mesmo sendo responsável pela redução da vida de máquinas agrícolas, ela não é considerada uma grande causa, e conseqüentemente, não é tratada com devida importância. Falhas catastróficas podem ocorrer no equipamento mesmo que a quantidade de metal destruída seja pequena, como a redução na espessura da camada de metal, ocasionando a perda da resistência mecânica do equipamento, diminuição da vida do mesmo, contaminação do fluido que escoar nas tubulações, entupimento dos emissores, perfuração da tubulação, e até danos a válvulas metálicas e bombas (EKER; YUKSEL, 2005).

2.6.1 Possibilidade de corrosão ou aumento da corrosão na fertirrigação

Como muitos fertilizantes são corrosivos, é necessário um certo cuidado ao selecionar quais serão usados na fertirrigação, assim como o tipo de material do sistema. Esta deve ser uma ação conjunta, onde deve-se escolher o material do sistema de fertirrigação de acordo com o tipo de fertilizante que será aplicado ou vice e versa, como exemplifica a Tabela 4 (SUNNY; HAKKIM, 2016).

Alguns fertilizantes podem ser mais corrosivos que outros, principalmente se reagirem com água e produzirem substâncias agressivas como amônia ou gás sulfídrico. Lembrando que os fertilizantes não são corrosivos, exceto se estiverem em contato com água ou umidade. Por

exemplo, o nitrato de amônia absorve umidade somente quando a umidade relativa do ar está acima de 60%, alguns fosfatos quando está acima de 90% (SUNNY; HAKKIM, 2016).

Tabela 4 - Corrosividade dos fertilizantes.

Tipo de metal	Nitrato de Cálcio [Ca(NO ₃) ₂]	Sulfato de Amônio [(NH ₄) ₂ SO ₄]	Nitrato de Amônio (NH ₄ NO ₃)	UREIA	Ácido Fosfórico (H ₃ PO ₄)	Fosfato Diamônio (DAP)
Aço galvanizado	2	4	4	1	4	1
Alumínio	-	1	1	-	2	2
Aço inoxidável	-	-	-	-	1	-
Bronze	1	3	3	-	2	4
Latão	1	2	3	-	2	4

Legenda: Grau de corrosividade de 1 a 5.

Fonte: Adaptado de Sunny e Hakkim (2016).

O potencial de corrosão dos fertilizantes varia com o tipo de nutriente e pode afetar os equipamentos do sistema de injeção de fertilizantes. O sulfato de amônio e o ácido fosfórico estão entre os mais corrosivos; a ureia é o menos corrosivo entre os fertilizantes nitrogenados, tendo pouca ou nenhuma corrosão em contato com o aço galvanizado. A lavagem da tubulação com água pura após a fertirrigação minimiza os riscos de corrosão (BORGES; SILVA, 2009).

Fertilizantes a base de nitrogênio são propensos a corrosão lenta quando reagem com aços carbono. Fertilizantes a base de fosfatos são predispostos a criar um filme sobre a superfície metálica protegendo-a da corrosão quando em contato com produtos à base de nitrogênio. Nos dois casos os fertilizantes provocam pouca ou nenhuma corrosão quando em estado sólido, entretanto, quando são hidratados, como por exemplo se o ar estiver com alta umidade relativa, eles podem absorver a umidade e causar corrosão mais severa (ROFFEY, 2015).

Testes de resistência a corrosão foram executados por Eker e Yuksel (2005), onde amostras de aço com baixa quantidade de carbono e aço galvanizado foram imersas em soluções de fertilizantes por 500 horas em temperatura ambiente. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Taxas de corrosão por fertilizantes em aços baixa liga e galvanizado.

Fertilizante	Perda de espessura equivalente após um ano (μm)	
	Aço Carbono Baixa Liga	Aço Galvanizado
Nitrato de Amônio Solução Saturada e 63% de concentração	1,250 e 380	250 e 280
Nitrato de Amônio e Cal Solução Saturada e 67% de concentração	815 e 1070	330 e 340
Fertilizante Composto (0, 24, 24) - Solução Saturada	200	60
Água limpa	60	20

Fonte: Adaptado de Eker e Yuksel (2005).

Conforme a Tabela 5, nota-se que o aço galvanizado teve menor perda de espessura quando comparado com o aço carbono de baixa liga, provando que é mais resistente a corrosão. Observa-se também que, nas soluções saturadas, houve uma perda de espessura menor que nas soluções com menores concentrações.

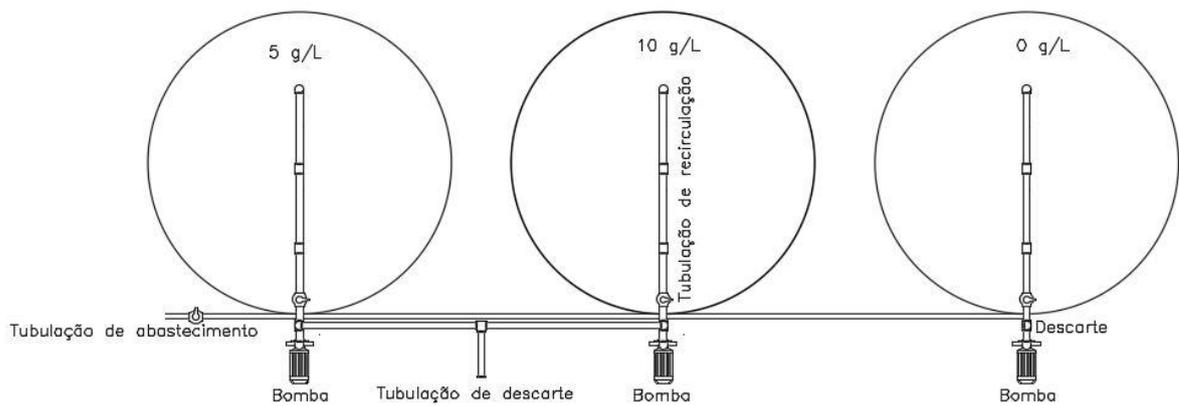
3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Irrigação, situado no Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento (DRS) da Universidade Federal de Lavras, onde foram instaladas três caixas d'água de 1000 litros, cada uma com sua respectiva bomba, da marca Somar modelo SFP-35 de 0,5 cv, monofásica.

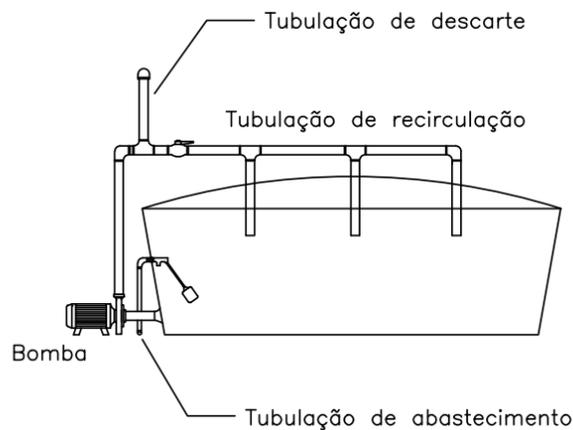
Foram utilizados tubos e conexões de PVC de 32 mm soldáveis para a construção da tubulação de recirculação do fluido e para a retirada do mesmo; nessas tubulações foram utilizados 9 registros de esfera, 3 para cada caixa. O esquema de montagem está apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema do aparato experimental. a) planta; b) corte.

(a)



(b)



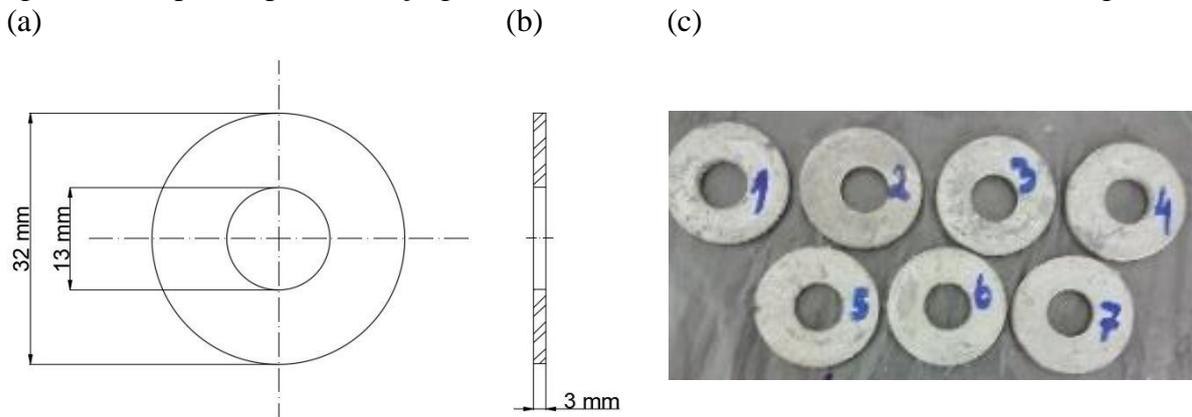
Fonte: Do autor (2018).

O experimento consistiu em simular a fertirrigação de um pivô central durante 10 anos, supondo 5 fertirrigações por ano, com requerimento anual de fertilizante 20-00-20 igual a 1500 kg/ha, em uma área de 50 ha, com lâmina de irrigação diária de 9 mm para uma jornada diária de 21 h.

Considerando que o pivô central operando com velocidade de deslocamento de 100%, levaria 7 h para completar uma volta, a lâmina aplicada seria de 3 mm. Deste modo, o volume de água aplicado por volta seria igual a 1500 m³ e um total de 15000 kg de fertilizante em 50 ha, a concentração de fertilizante resultante na água seria igual a 10 g/l.

Sendo assim, a duração de cada fertirrigação simulada foi de 7 h com frequência de 5 fertirrigações por ano, totalizando 50 eventos em aproximadamente 10 anos. E a partir da concentração de 10 g/l, foi feita uma segunda concentração de 5 g/l para comparação do efeito da corrosão em corpos de prova de aço galvanizado, do mesmo material da tubulação do pivô central, e que foram fornecidos pela Valmont, fabricante de pivôs. Os corpos de prova estão apresentados na Figura 3, estes são arruelas de 32 mm de diâmetro externo, 13 mm de diâmetro interno e 3 mm de espessura, similar à tubulação aérea do pivô central.

Figura 3 - Corpos de prova de aço galvanizado. a) vista frontal; b) vista lateral; c) fotografia.

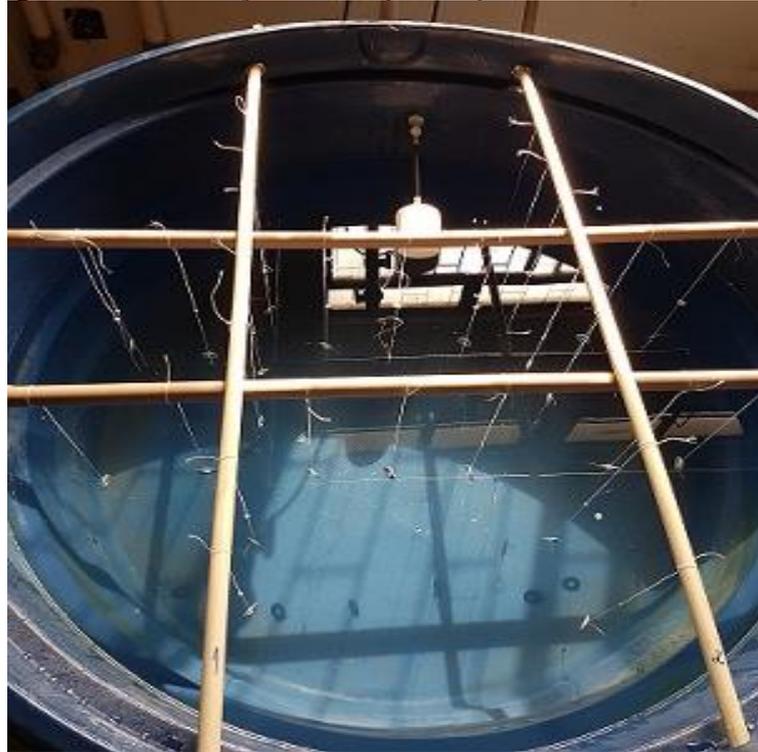


Fonte: Do autor (2018).

Nas caixas havia 500 litros de água com concentrações de 0, 5, e 10 g/l de fertilizante 20-00-20 (20% de nitrogênio a partir da uréia, 0% de fósforo e 20% de óxido de potássio (K₂O) obtidos da fonte cloreto de potássio branco). O abastecimento das caixas foi feito com a água tratada servida na UFLA.

Os corpos de prova ficaram suspensos dentro das caixas com o auxílio de tubos de PVC e linhas de polietileno, para garantir a localização em profundidade mediana e para que não houvesse colisão entre os mesmos, conforme é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Distribuição dos corpos de prova dentro das caixas.



Fonte: Do autor (2018).

Para a simulação da fertirrigação foram utilizados 21 corpos de prova para cada ano simulado, sendo 7 para cada concentração, totalizando 210 amostras ao longo de 10 anos de simulação. O teste foi operado em horas corridas e ao término de cada ciclo eram retirados seus respectivos corpos de prova.

3.1 Análise qualitativa dos corpos de prova

A primeira análise de corrosão foi feita por meio de figuras macroscópicas (fotografias) que foram obtidas antes e depois das simulações, a fim de documentar a distribuição da corrosão nas amostras.

Para obter maiores informações sobre o tipo de corrosão na superfície metálica dos corpos de prova, foram efetuadas fotografias aproximadas das amostras. Estas imagens foram feitas com a câmera digital microscópica portátil Dino-Lite plus, com aproximação de 40 vezes.

3.2 Análise quantitativa dos corpos de prova

As análises da taxa de corrosão e perda de massa por área foram feitas por meio de testes de corrosão por imersão, seguindo os procedimentos adaptados da Norma G 31 proposta pela

American Society for Testing Materials (ASTM, 2004), em que os corpos de provas são imersos em intervalos de tempo determinados nas soluções. A cada ano de simulação, as arruelas foram retiradas para a análise de perda de massa.

Para a análise de perda de massa do material metálico, os corpos de prova, após retirados da imersão, foram secados durante uma hora a uma temperatura de 65 °C na estufa de ventilação forçada da marca Marconi modelo MA 035 localizada no Laboratório de Análise de Física do Solo (LAFS), do DRS. Logo após a secagem, os corpos de prova foram pesados em balança de precisão da marca Scientech modelo SA 210, localizada no Laboratório de Hidrologia Ambiental (LHA) no mesmo departamento.

A perda de massa por área dos corpos de prova foi calculada pela diferença entre as massas inicial e final dos corpos de prova, antes da retirada dos produtos de corrosão, dividida pela área exposta às soluções

Ao final do procedimento experimental, os corpos de prova foram pesados novamente, após a retirada dos produtos de corrosão. Para a retirada dos produtos de corrosão foram seguidos os procedimentos indicados na Norma G 1 proposta pela *American Society for Testing Materials* (ASTM, 1999). Em que, primeiramente, foi feita uma leve escovação nas amostras, com uma escova de nylon, durante 30 segundos e com rotação de 1800 rpm. Em seguida, foi feita a imersão em solução de 1000 ml de água com 100 g de persulfato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$, durante 5 min em temperatura de 20 a 25 °C. Logo após, as amostras foram banhadas em água destilada e escovadas novamente, e por último, foram secadas em estufa durante 1 hora à uma temperatura de 65 °C.

Para o cálculo de taxa de corrosão por perda de massa foi usada a equação 1, proposta pela Norma G 31 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2004).

$$\text{Taxa de corrosão} = \frac{K \times W}{A \times t \times \rho} \quad (1)$$

A equação acima determina a corrosão ocorrida em centímetros por hora e a constante K corrige o valor como se a corrosão ocorresse em todas as demais horas por ano, na mesma intensidade. No caso de um pivô central que opera 5 fertirrigações por ano (simulação realizada nesta pesquisa), o restante da corrosão sofrida ao longo do ano caberá ao efeito da presença de água, decorrente de irrigações.

Em que:

K - constante utilizada para a obtenção da unidade de taxa de corrosão requerida;

t - tempo de exposição (horas);

A - área exposta (cm²);

W - perda de massa (g);

ρ - densidade do material (g/cm³).

A perda de massa (W) foi calculada pela diferença entre a massa inicial, antes do teste, e a massa final da amostra após a retirada dos produtos de corrosão.

Com a finalidade de eliminar a chance de uma possível perda de material metálico durante a limpeza, e que, esta perda seja acrescentada no cálculo da taxa de corrosão, foi necessário o teste com amostras que não sofreram o processo de corrosão passando pelo mesmo procedimento de limpeza. Os dados desse procedimento estão apresentados no Anexo A.

Assim, se houver diferença entre as massas inicial e final das amostras, o valor médio dessa perda deve ser utilizado para a correção da perda de massa, em que, o valor médio da perda de material metálico é decrescido do valor da perda de massa após a limpeza dos produtos de corrosão. O valor de correção utilizado para este cálculo está apresentado na Tabela A.1 no Anexo A.

3.3 Características da água de abastecimento

Segundo a Diretoria de Meio Ambiente da Universidade Federal de Lavras, a água servida no campus é tratada segundo a Norma de Potabilidade 518/2005 (DMA, 2019). A Tabela 6 apresenta os dados mensais médios do controle dessa água de abastecimento, a qual foi utilizada para a produção das soluções do procedimento experimental durante os meses de outubro e novembro de 2018. Estes valores foram obtidos na Estação de Tratamento de Água (ETA) com o apoio da Diretoria de Meio Ambiente (DMA).

Tabela 6 - Dados mensais médios do controle da água de abastecimento servida na UFLA.

Saída ETA – UFLA							
Média do mês	OD (mg/l)	pH	C.E. (μS/cm)	Sólidos totais (mg/l)	Sólidos dissolvidos (mg/l)	Sólidos suspensos (mg/l)	Fe (mg/l)
Outubro	7,18	7,45	97,33	105	231,67	0,22	-
Novembro	6,69	7,74	119,2	165	-	0,335	0,032

Fonte: Adaptado de dados fornecidos pela ETA e DMA (2019).

De acordo com a Norma NBR 12212 proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992), os dados da água utilizada na produção das soluções (Tabela 6), indicam que a água de abastecimento não apresenta caráter corrosivo, pois possui pH neutro, condutividade elétrica baixa, quantidades de sólidos baixas e concentração de ferro baixa. Porém, a quantidade de oxigênio dissolvido foi acima do recomendado pela norma.

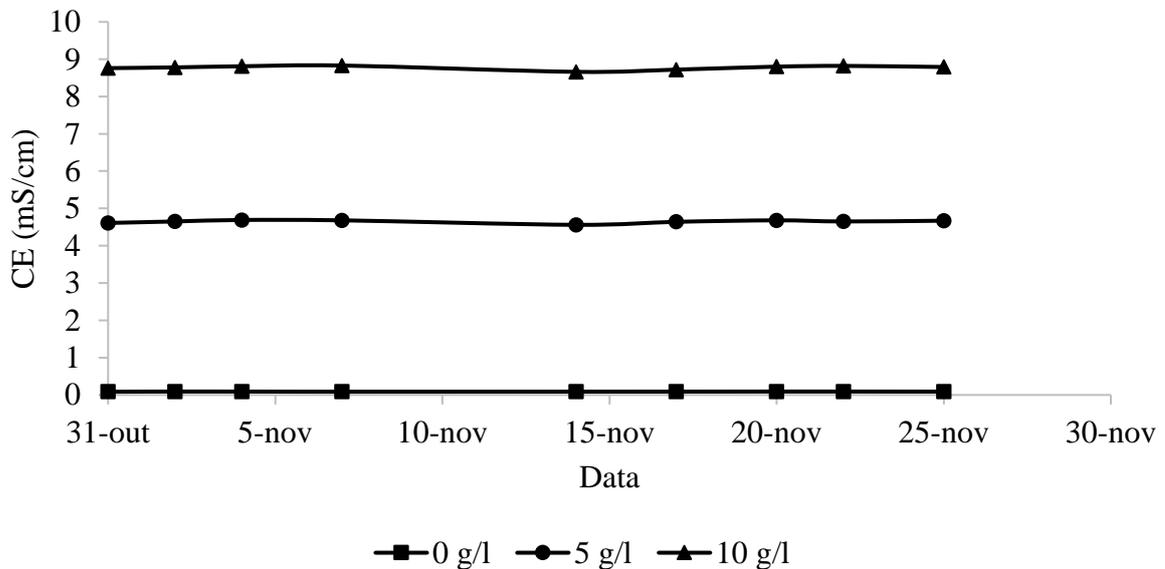
3.4 Monitoramento das soluções

Foram feitas análises físico-químicas das soluções em que os corpos de prova foram imersos. Para isto, foram retiradas amostras das soluções das caixas periodicamente, e as mesmas foram analisadas no Laboratório de Análise Química (LAQ), no Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento da UFLA, a fim de manter o acompanhamento da condutividade elétrica e do pH das soluções ao longo do experimento. O equipamento utilizado foi o medidor de bancada AKSO modelo AK151, o qual possui compensação de temperatura automática.

No Gráfico 1 estão apresentados os valores das medições de condutividade elétrica (CE) das soluções. Para a solução sem adição de fertilizante (0 g/l) houve uma variação de 0,087 a 0,092 mS/cm (miliSiemens por centímetro), para a solução de 5 g/l foi de 4,56 a 4,69 mS/cm e para a solução de 10 g/l foi de 8,66 a 8,81 mS/cm.

A pequena variação ao longo do período entre os resultados das soluções de 0 e 10 g/l pode ter sido atribuída pelo erro do equipamento de medição, que para a condutividade elétrica na faixa de medição de 0,00 a 19,99 mS/cm é de $\pm 0,01$ mS/cm. Já para os resultados da solução de 5 g/l ocorreu uma variação maior.

Gráfico 1 - Condutividade elétrica das soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.

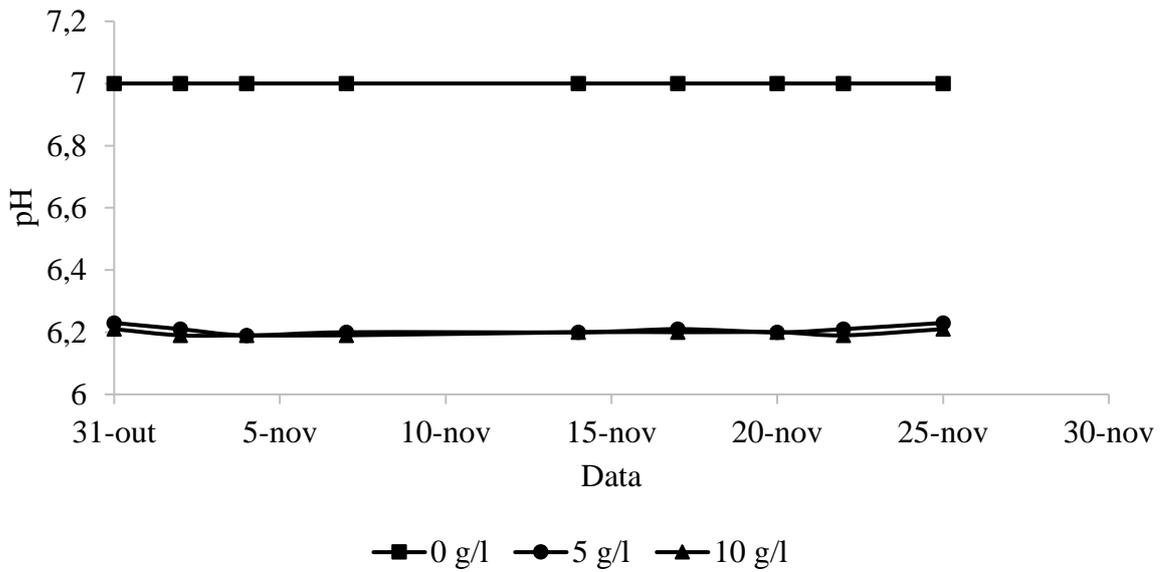


Fonte: Do autor (2018).

É possível observar no Gráfico 1 que não houve variação significativa dos valores de condutividade elétrica, descartando a influência de variações deste parâmetro sobre a corrosão, ao longo dos 10 anos de simulação.

Os valores de pH das soluções estão apresentados no Gráfico 2, os quais foram praticamente constantes. Para a solução sem adição de fertilizante (0 g/l) permaneceu igual a 7 e para as soluções de 5 e 10 g/l houve pequenas variações e resultados praticamente iguais para as soluções, oscilando entre 6,23 e 6,19. Essa pequena variação ao longo do período pode ser atribuída ao erro do equipamento de medição, que para esta faixa de medição é de $\pm 0,01$ pH.

Gráfico 2 - pH das soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.



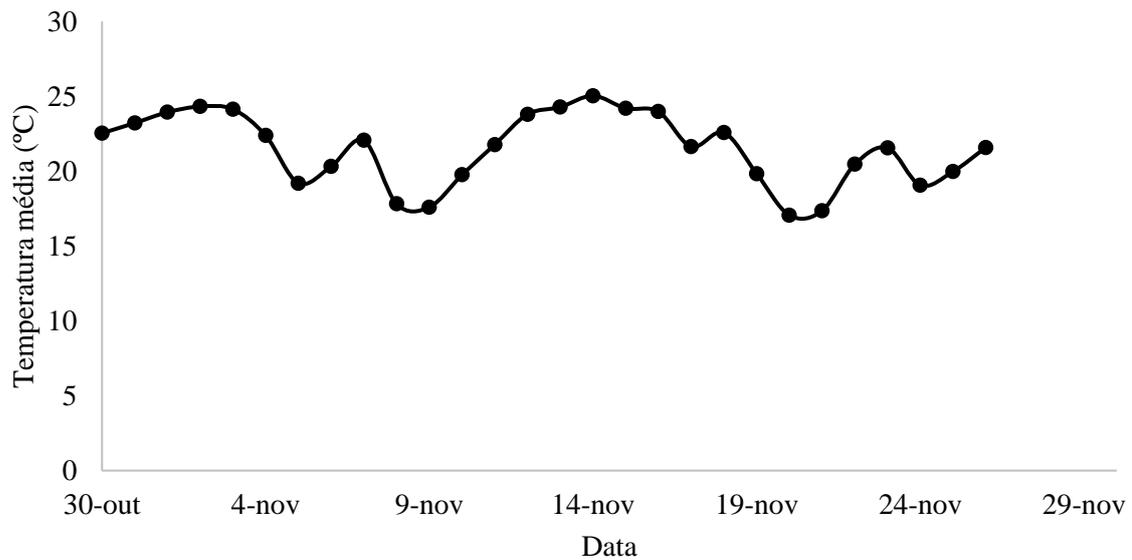
Fonte: Do autor (2018).

Como não houve mudança significativa no pH das soluções ao longo do experimento, foi descartada a influência das variações deste parâmetro sobre a corrosão durante as simulações. Além disso, os valores de pH das soluções são considerados neutros, não possuindo ação corrosiva.

Também foi feito o acompanhamento da temperatura ambiente devido a influência deste parâmetro no aumento da corrosão, já que, de acordo com Gentil (2011), o aumento da temperatura pode causar a aceleração da corrosão.

O Gráfico 3 apresenta os valores de temperatura ambiente média no período do experimento, ou seja, período dos testes de corrosão por imersão, que ocorreram entre 30/10/2018 e 26/11/2018. A temperatura média oscilou entre 17 e 25 °C, esta foi calculada a partir dos dados obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018), que foram retirados da estação convencional de Lavras-MG.

Gráfico 3 - Temperaturas ambiente médias durante o experimento.



Fonte: Do autor (2018).

3.5 Análise estatística

Para análise estatística foi utilizado um esquema fatorial 3 x 10, com 7 repetições, sendo a análise de variância realizada por meio do teste F. Em caso de fonte de variação significativa pelo teste F, as médias das concentrações de fertilizante na água foram comparados pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Já para o estudo do efeito do tempo sobre a perda de massa foi utilizada análise de regressão. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software estatístico AGROESTAT em sua versão 1.1 (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015).

3.6 Simulação da perda de espessura em aço galvanizado utilizado em pivô central

A estimativa da taxa de corrosão de uma tubulação aérea de um pivô central deve considerar a fertirrigação e a irrigação que ocorrem ao longo de cada ano. Para simular os efeitos da irrigação somente, os dados da solução sem adição de fertilizante podem ser utilizados, considerando que, a soma da taxa de corrosão para fertirrigação à taxa de irrigação (0 g/l) é similar à taxa de corrosão em uma tubulação de um pivô central utilizado alternando as duas práticas. Lembrando que, neste caso, foi desconsiderada a possível diferença no mecanismo de corrosão nas trocas de irrigação para fertirrigação nos anos subsequentes.

Dessa forma, para a simulação da estimativa de vida e perda de espessura de uma tubulação de aço galvanizado utilizada em pivô central, foram feitas predições da perda de material metálico baseando-se nas médias da taxa de corrosão dos corpos de prova de aço galvanizado submetidos aos testes de imersão, considerando três cenários:

- a) 735 horas de irrigação por ano utilizando água sem adição de fertilizante;
- b) 735 horas de irrigação por ano, sendo 700 horas somente irrigação (0 g/l) e 35 horas de fertirrigação com o fertilizante 20-00-20 na concentração de 5 g/l;
- c) 735 horas de irrigação por ano, sendo 700 horas somente irrigação (0 g/l) e 35 horas de fertirrigação com o fertilizante 20-00-20 na concentração de 10 g/l.

Para o cálculo da perda de espessura acumulada ao longo dos anos de irrigação em micrometros foi utilizada a Equação 2, para simular apenas irrigação e a Equação 3, para simular fertirrigação alternada com irrigação.

$$PE = (K_{I_n} \times 735) + (K_{I_{n-1}} \times 735) \quad (2)$$

$$PE = [(K_{F_n} \times 35) + (K_{I_n} \times 700)] + [(K_{F_{n-1}} \times 35) + (K_{I_{n-1}} \times 700)] \quad (3)$$

Em que:

PE - perda de espessura (μm);

K_{I_n} - taxa de corrosão por ano de fertirrigação da concentração de 0 g/l ($\mu\text{m}/\text{h}$);

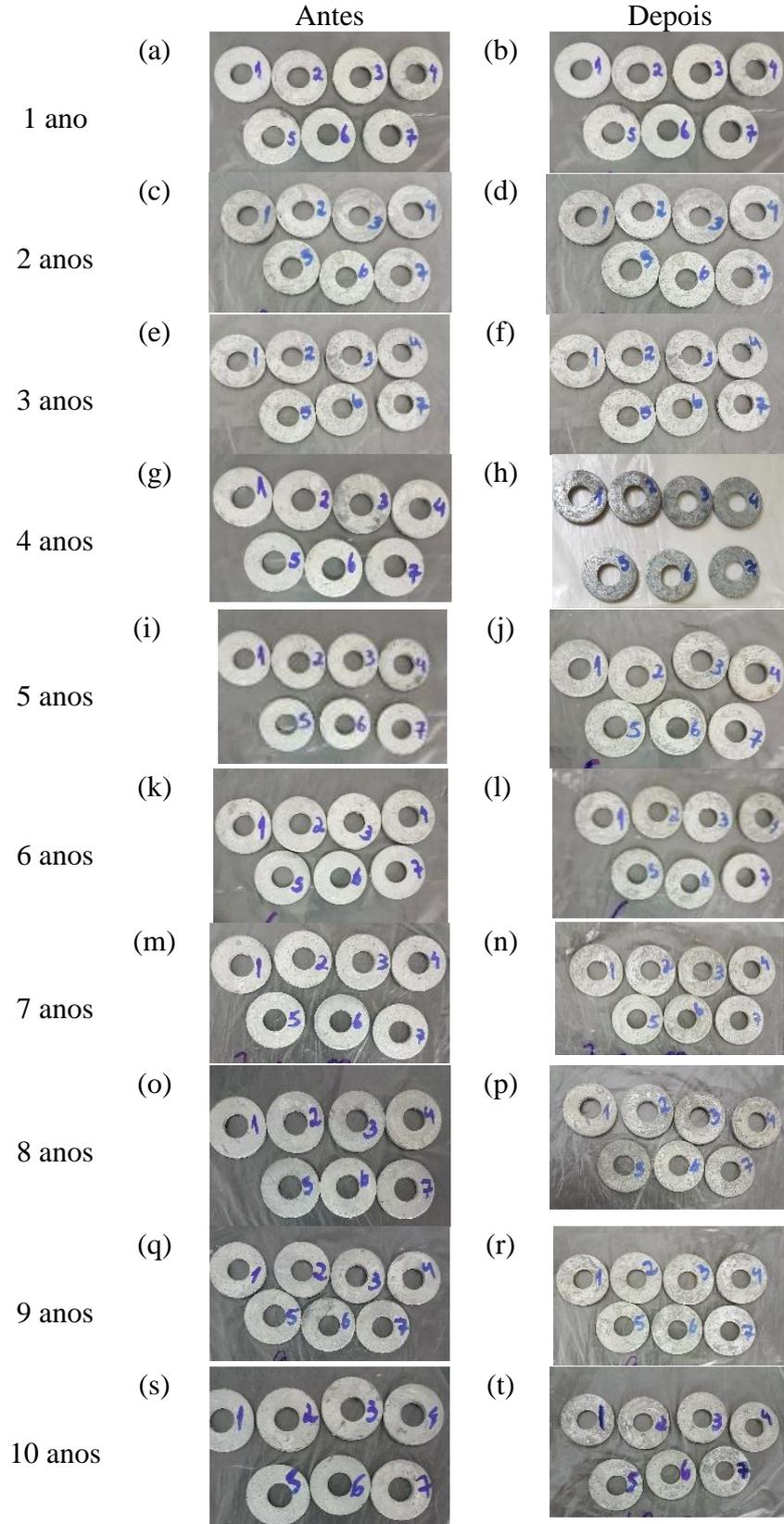
K_{F_n} - taxa de corrosão por ano de fertirrigação com concentração de 5 ou 10 g/l ($\mu\text{m}/\text{h}$);

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Qualitativa

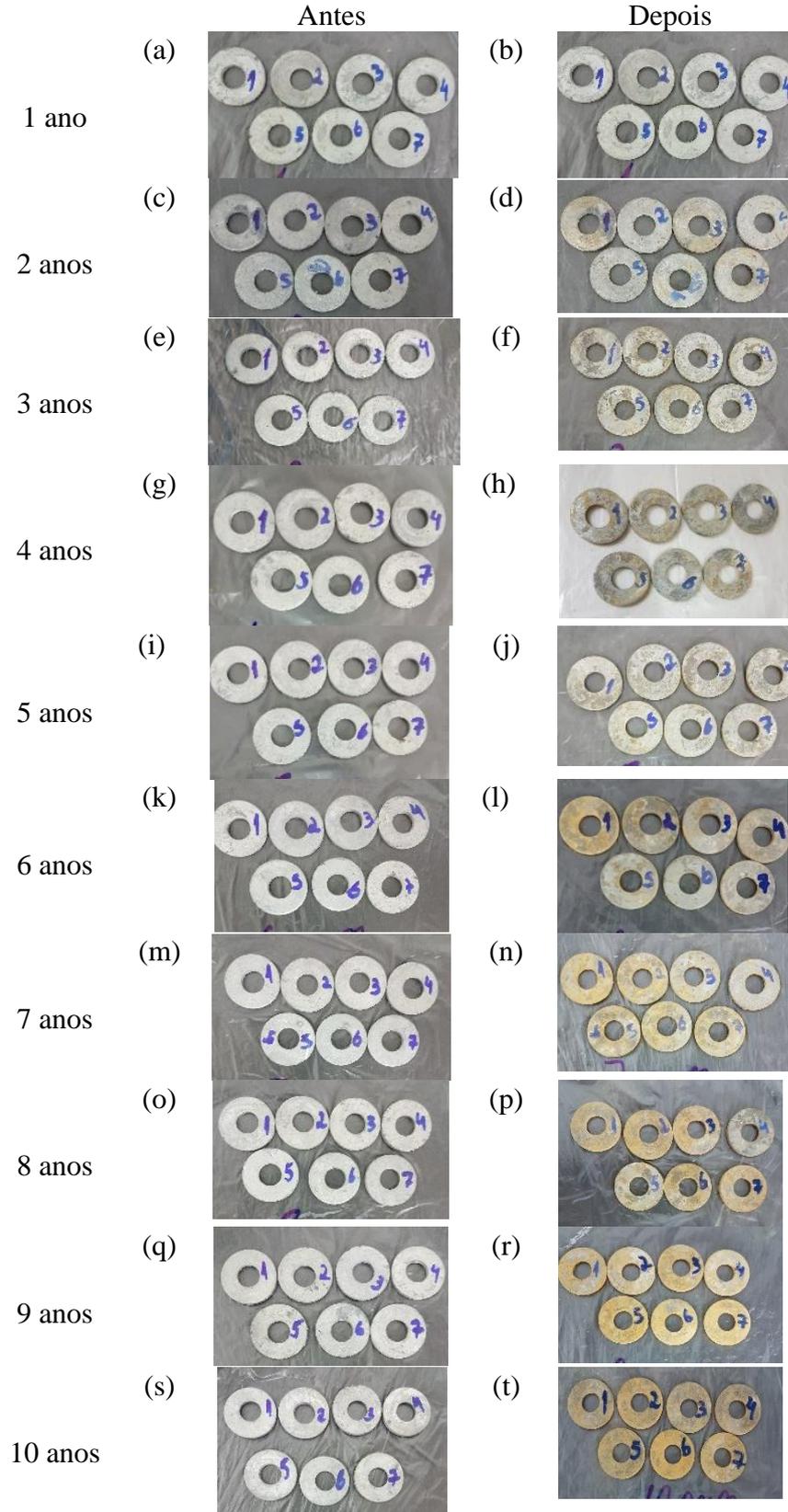
A primeira análise de corrosão realizada foi a comparação visual dos corpos de prova, por meio de figuras macroscópicas (fotografias) que foram efetuadas antes e depois das simulações, a fim de documentar a distribuição da corrosão nas amostras. Nas Figuras 5, 6 e 7 são apresentadas as imagens dos corpos de prova antes e depois de cada ano de simulação para as soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.

Figura 5 - Corpos de prova antes e depois dos testes de imersão com tempo de simulação de 1 a 10 anos em soluções sem adição de fertilizante 20-00-20.



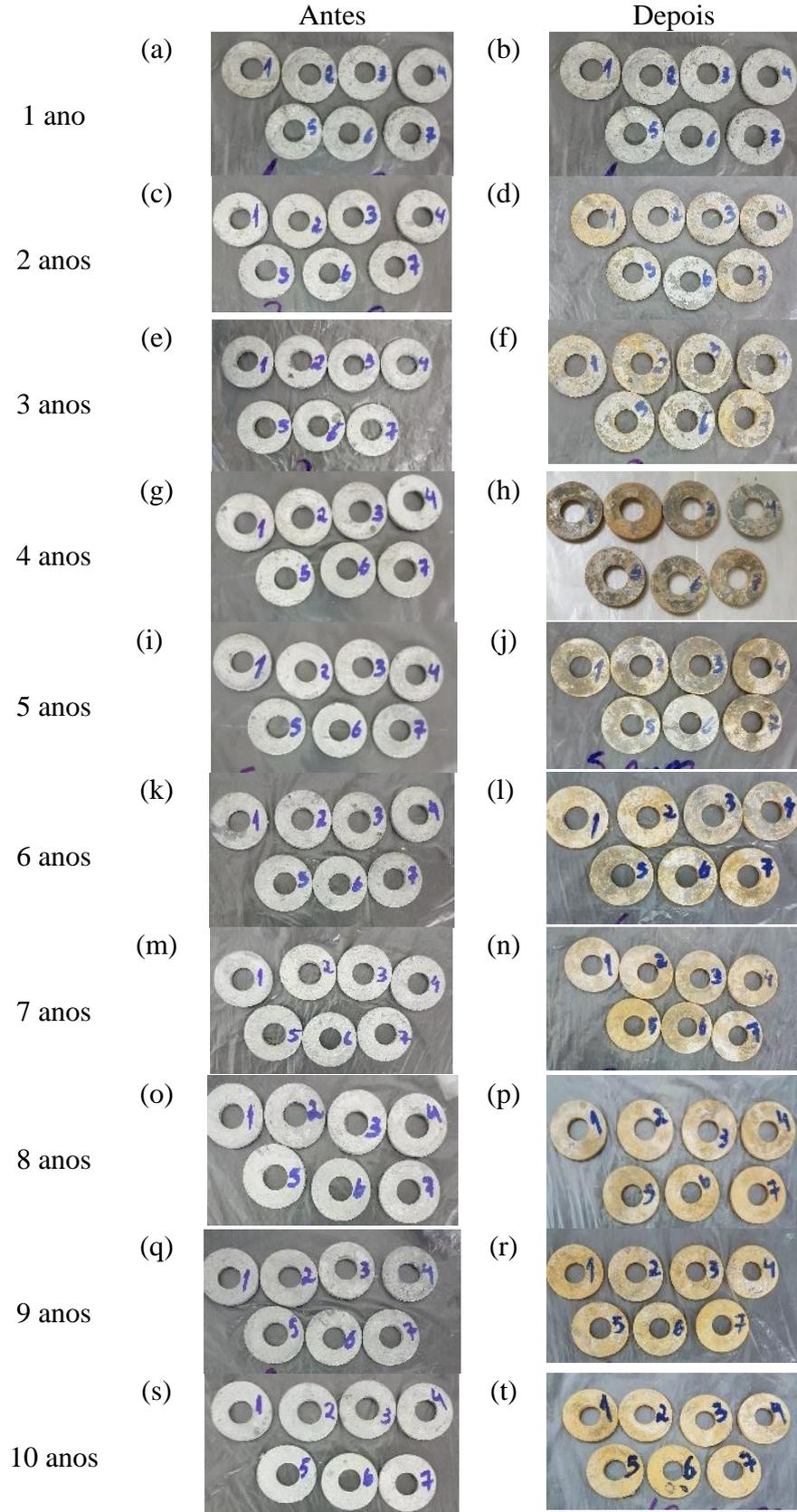
Fonte: Do autor (2018).

Figura 6 - Corpos de prova antes e depois dos testes de imersão com tempo de simulação de 1 a 10 anos em soluções na concentração de 5 g/l de fertilizante 20-00-20.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 7 - Corpos de prova antes e depois dos testes de imersão com tempo de simulação de 1 a 10 anos em soluções na concentração de 10 g/l de fertilizante 20-00-20.



Fonte: Do autor (2018).

É possível observar na Figuras 5 que nos primeiros anos, as amostras da solução sem adição de fertilizante não tiveram mudanças de aspecto visual. Já do quarto ano em diante houve um escurecimento parcial na superfície das amostras, o que foi atribuído como corrosão.

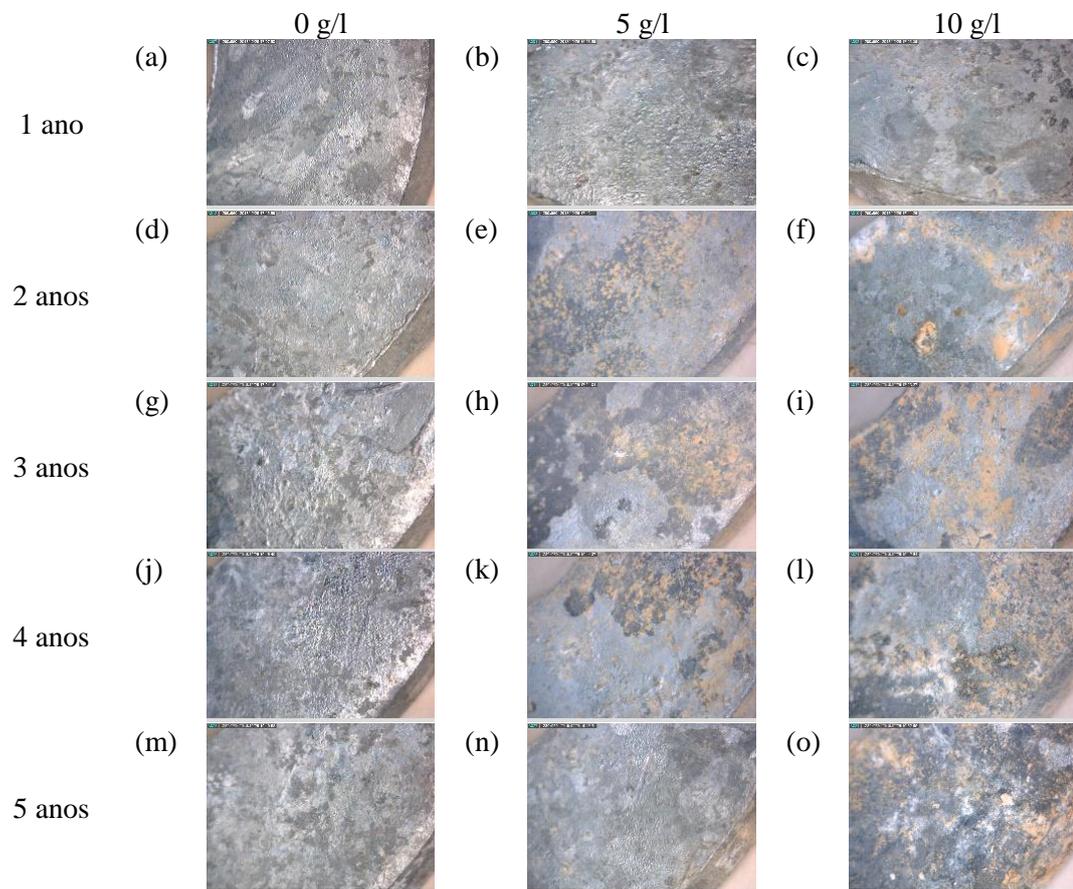
Nas Figuras 6 e 7 ainda é possível observar que, a partir do segundo ano de simulação houve um efeito nos corpos de prova de 5 e 10 g/l, começando com a mudança de coloração dos mesmos, em que, partes da superfície exposta ganharam tonalidades “alaranjadas”, cor semelhante à da oxidação, mostrando que a partir deste ponto estava ocorrendo a corrosão.

Apenas a partir do sexto ano de simulação que foi possível observar um aspecto de corrosão uniforme nas amostras, em que, a coloração alaranjada já estava em praticamente toda a superfície metálica. Também se observou uma deposição de partículas ou depósitos na superfície das amostras das soluções de 5 e 10 g/l. Essa deposição foi maior na solução com concentração de 10 g/l, isso ocorre devido a maior quantidade de sólidos totais dissolvidos dessa solução.

Os valores de condutividade elétrica das soluções de 5 e 10 g/l (Gráfico 1) são considerados tipicamente corrosivos, segundo a Norma NRBR 12212 proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992), águas com concentrações superiores a 1 g/l são consideradas corrosivas. A condutividade elétrica cresce proporcionalmente com a quantidade de sólidos totais dissolvidos, sendo assim, essas soluções possuem potencial corrosivo para o aço galvanizado, influenciando a perda de massa e a taxa de corrosão dos corpos de prova.

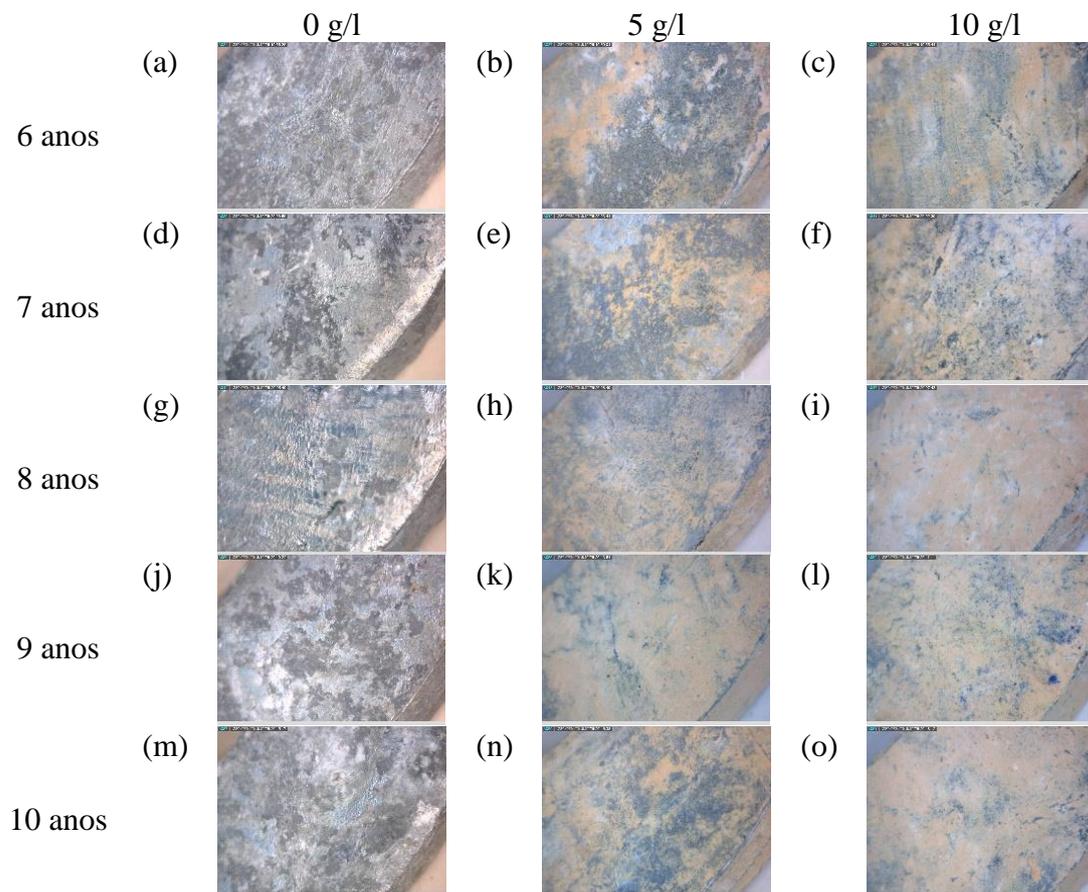
Fotografias aproximadas foram efetuadas para a obtenção de maiores informações sobre o tipo de ataque que as amostras sofreram. Como é apresentado nas Figuras 8 e 9, é confirmado o aspecto de corrosão uniforme nos corpos de prova somente a partir do sexto ano de simulação, sendo a coloração esbranquiçada das imagens indicativos de corrosão uniforme sobre a superfície metálica das amostras.

Figura 8 - Figuras aproximadas 40x dos corpos de prova após os testes de imersão com tempo de simulação de 1 a 5 anos em soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 9 - Figuras aproximadas 40x dos corpos de prova após os testes de imersão com tempo de simulação de 6 a 10 anos em soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.



Fonte: Do autor (2018).

4.2 Análise Quantitativa

4.2.1 Perda de massa ao longo do tempo

O resumo da Análise de Variância realizada na avaliação da perda de massa por área dos corpos de prova de aço galvanizado, causado pela exposição do material a soluções com diferentes concentrações de fertilizante está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Quadro resumo da ANOVA realizada na avaliação de perda de massa em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 e tempos de contato.

Causas da variação	GL	Quadrado Médio e significância de F
		Perda de massa
Concentração (C)	2	0,00003303*
Tempo (T)	9	0,00000481*
C x T	18	0,00000145*
Resíduo	180	0,000000257
Total	209	-
Coeficiente de variação		57,44287

Legenda: ns: não significativo. *: significativo ao teste F a 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2019).

Percebe-se que tanto a variação de concentração de fertilizante quanto a variação do tempo de contato foram estatisticamente significativas para a perda de massa por área, bem como a interação entre as duas fontes de variação.

Na Tabela 8 está apresentado o efeito simples da variação de concentração, comparando as médias da perda de massa por área para cada concentração. É possível observar que a concentração de 10 g/l provocou a maior perda de massa, seguida da concentração de 5 g/l, que resultou em aproximadamente metade da perda referente à 10 g/l. A solução sem adição de fertilizante (0 g/l) foi a que menos causou perda de massa, sendo esta muito baixa quando comparada às soluções com adição de fertilizante.

Os resultados obtidos por Eker e Yuksel (2005) corroboram com o obtido nesta pesquisa, em que a perda de espessura do aço galvanizado causada pela corrosão foi consideravelmente menor para solução sem adição de fertilizante.

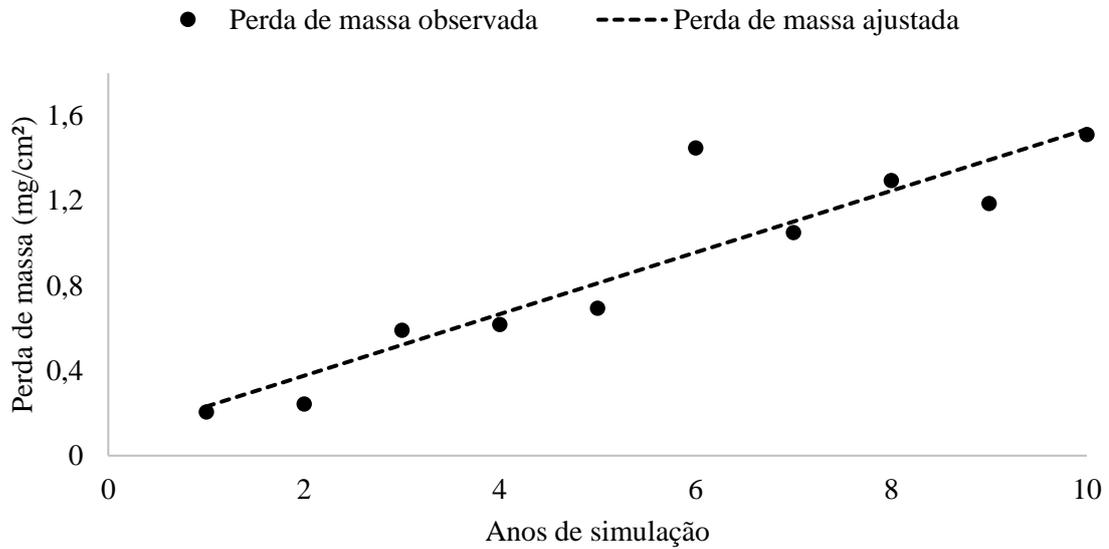
Tabela 8 - Comparação entre as médias da perda de massa por área em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.

Concentração (g/l)	Perda de massa (mg/cm ²)
10	1,566 a
5	0,893 b
0	0,192 c

Fonte: Do autor (2019).

O Gráfico 4 mostra o efeito simples do tempo de exposição dos corpos de prova nas soluções com diferentes concentrações de fertilizante. O comportamento deste efeito foi melhor representado por um modelo matemático linear, ou seja, quanto maior o tempo de exposição maior foi a perda de massa por área.

Gráfico 4 - Efeito do tempo de exposição dos corpos de prova de aço galvanizado em soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.



Legenda: R^2 Equação
 Perda de massa ajustada 0,8411 $PM = 8,6E-05 + 1,45E-04t$
 Fonte: Do autor (2019).

Na Tabela 9 estão apresentadas as médias da perda de massa dos corpos de prova para a interação entre as fontes de variação. Estes valores se referem a perda de massa média inicial das amostras, ou seja, antes da limpeza dos produtos de corrosão.

Tabela 9 - Balanço da perda de massa em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 e tempos de contato.

Tempo de fertirrigação (anos)	Tempo (horas.ano)	Perda de massa (mg/cm ²)		
		0 g/l	5 g/l	10 g/l
1	35	0,094 a	0,280 a	0,243 a
2	70	0,090 a	0,281 a	0,356 a
3	105	0,135 b	0,869 a	0,767 a
4	140	0,193 b	0,435 b	1,222 a
5	175	0,267 b	0,552 b	1,263 a
6	210	0,229 c	1,373 b	2,740 a
7	245	0,237 c	0,928 b	1,982 a
8	280	0,239 c	1,371 b	2,273 a
9	315	0,211 c	1,268 b	2,081 a
10	350	0,226 c	1,574 b	2,731 a

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

Fonte: Do autor (2019).

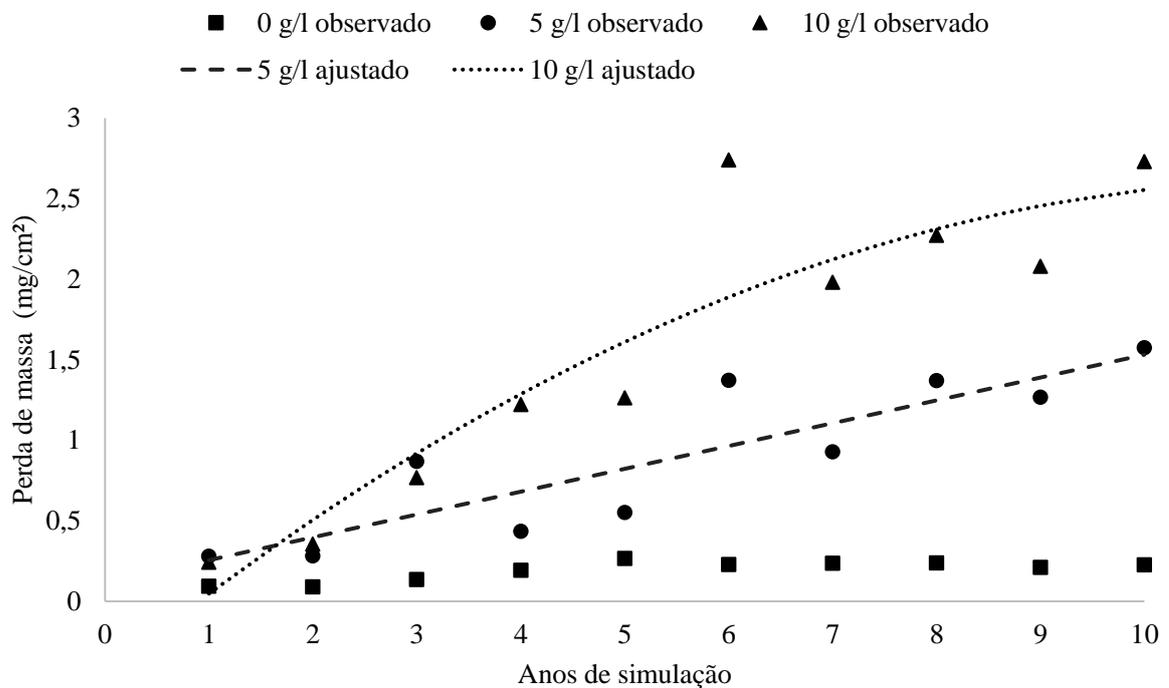
É possível observar na Tabela 9 que houve diferenciação estatisticamente significativa dos valores de perda de massa por área a partir do terceiro ano de fertirrigação simulada, sendo

que, após o quinto ano, para as três concentrações analisadas individualmente, foram verificados valores diferentes entre si de perda de massa por unidade de área.

No Gráfico 5 é apresentado o efeito do tempo em cada uma das concentrações de fertilizante 20-00-20 na perda de massa por área dos corpos de prova. Nota-se que os valores de perda de massa aumentam com o tempo de exposição dos corpos de prova, exceto para a solução sem adição de fertilizante (0 g/l), e que, além deste crescimento, houve um aumento considerável nessa perda no sexto ano para as concentrações de 5 e 10 g/l, seguido de um decréscimo e, nos anos seguintes, esta voltou a ter certo crescimento.

O fato de ter ocorrido um pico no sexto ano pode ser explicado ainda com as imagens macroscópicas dos corpos de prova, visto que, visualmente foi possível identificar o aumento de depósitos nas amostras. Após o sexto ano de simulação, houve aumento considerável desta deposição, a qual foi agregada na pesagem dos corpos de prova, assim, os valores da massa após a simulação tiveram um decréscimo. Além disso, os produtos de corrosão formados na superfície dos corpos de prova a partir do sexto ano podem ter exercido a função de um filme protetor de óxido de zinco, protegendo-os da corrosão.

Gráfico 5 – Efeitos do tempo de exposição dentro das diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 na perda de massa dos corpos de prova de aço galvanizado.



Legenda:

5 g/l ajustado

10 g/l ajustado

Fonte: Do autor (2019).

R²

0,7731

0,8546

Equações

$PM = 1,14E-04 + 1,417E-04t$

$PM = -4,546E-04 + 5,25E-04t - 2,25E-05t^2$

O comportamento da estimativa do efeito do tempo de exposição na perda de massa, para as concentrações de 5 e 10 g/l de fertilizante 20-00-20, é explicado por meio de equações (Gráfico 5), sendo que para a solução sem adição de fertilizante este foi não significativo. Para a concentração de 5 g/l este efeito foi descrito por uma equação linear com coeficiente de determinação igual a 77,31%, e para a concentração de 10 g/l foi representado por uma equação quadrática com R^2 de 85,56%.

O aumento da perda de massa é causado pela corrosão que ocorre nos corpos de prova, já que esta promove deterioração de material metálico, conseqüentemente, ocasionando a perda de massa das amostras, a qual é acrescida ao longo do tempo. O mesmo ocorreu nos resultados obtidos por Suzumura e Nakamura (2004) e Diler et al. (2014), em que, a perda de massa causada pela corrosão em aço galvanizado e ligas de zinco aumentaram com o tempo de contato com o meio corrosivo.

4.2.2 Taxa de corrosão ao longo do tempo

O resumo da Análise de Variância realizada na avaliação da taxa de corrosão dos corpos de prova de aço galvanizado está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Quadro resumo da ANOVA realizada na avaliação de taxa de corrosão em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 e tempos de contato.

Causas da variação	GL	Quadrado Médio e significância de F
		Taxa de corrosão
Concentração (C)	2	0,000188547 ^{ns}
Tempo (T)	9	0,005435995*
C x T	18	0,000176604 ^{ns}
Resíduo	180	0,000230016
Total	209	-
Coeficiente de variação		81,296291

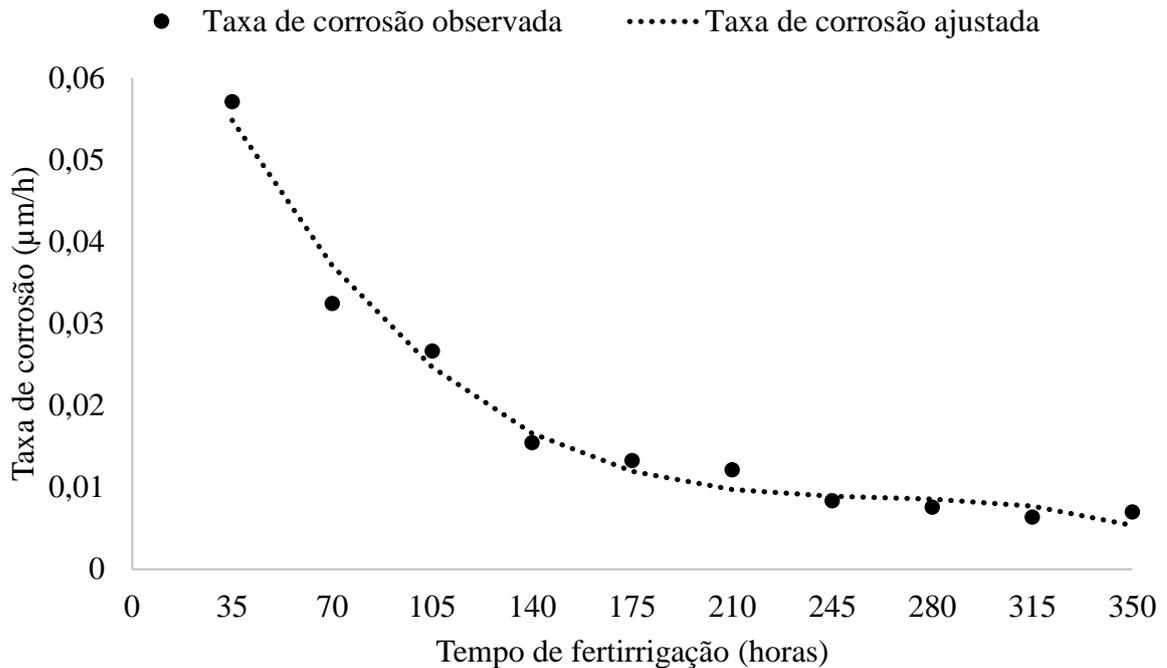
Legenda: ns: não significativo. *: significativo ao teste F a 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2019).

Como mostra a Tabela 10, para a taxa de corrosão, apenas o efeito simples do tempo de exposição foi estatisticamente significativo. O Gráfico 6 apresenta o efeito do tempo de exposição na taxa de corrosão média dos corpos de prova, a estimativa deste efeito pode ser explicada por uma função cúbica com R^2 de 98,07%. Cada ponto observado no Gráfico 6 refere-se à média das 3 concentrações para o mesmo tempo de exposição, e estes representam a penetração média da corrosão por ano no material metálico, neste caso, o aço galvanizado.

Nota-se que esta taxa decresce ao longo do tempo de exposição, passando de 0,06 μm nas primeiras 35 horas para 0,007 μm em 350 horas, reduzindo cerca de 10 vezes a penetração média no tempo de exposição equivalente a 10 anos de fertirrigação. Isso ocorre devido a formação de uma camada de óxido de zinco sobre a superfície metálica, que age como um filme protetor, protegendo o material da corrosão (MARDER, 2000).

Gráfico 6 – Efeitos do tempo de contato em solução de fertilizante 20-00-20 na taxa de corrosão de corpos de prova de aço galvanizado.



Legenda: R^2 Equação
 Taxa de corrosão ajustada 0,9807 $TC = 0,079 - 7,88E-04t + 3,0E-05t^2 - 3,8E-09t^3$
 Fonte: Do autor (2019).

É possível observar no Gráfico 6 que os valores de taxa de corrosão diminuem com o tempo de exposição dos corpos de prova nas soluções com diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20, e que não existe diferença estatisticamente significativa de acordo com o aumento da concentração de fertilizante.

Na Tabela 11 estão apresentadas as médias da taxa de corrosão por tempo dos corpos de prova, expressa em micrometros por hora. Estes dados são equivalentes a taxa de corrosão média das amostras, a qual foi calculada com os valores de perda de massa corrigida, após a limpeza dos produtos de corrosão.

Tabela 11 - Valores da taxa de corrosão em corpos de prova de aço galvanizado submetidos a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20 e tempos de contato.

Tempo de fertirrigação (anos)	Tempo (horas.ano)	Taxa de corrosão final ($\mu\text{m/h}$)		
		0 g/l	5 g/l	10 g/l
1	35	0,0474	0,0699	0,0542
2	70	0,0255	0,0346	0,0373
3	105	0,0216	0,0339	0,0244
4	140	0,0177	0,0147	0,0139
5	175	0,0154	0,0103	0,0142
6	210	0,0131	0,0141	0,0093
7	245	0,0100	0,0047	0,0105
8	280	0,0072	0,0101	0,0055
9	315	0,0079	0,0075	0,0038
10	350	0,0080	0,0052	0,0078

Fonte: Do autor (2019).

Diante dos resultados apresentados na Tabela 11, foi constatado que no primeiro ano de simulação houve uma pequena diferença de taxa de corrosão entre as concentrações, sendo a taxa de corrosão média da concentração de 5 g/l maior que a de 10 g/l que, por sua vez, foi superior que a da solução sem adição de fertilizante (0 g/l). A condutividade elétrica da solução com concentração de 10 g/l era maior, o que resulta em maior quantidade de sólidos totais dissolvidos, tornando esta solução mais corrosiva que as outras, não sendo observado este efeito neste experimento.

O mesmo fenômeno ocorreu nos resultados obtidos por Eker e Yuksel (2005), em que, a perda de espessura do aço galvanizado, calculada a partir da taxa de corrosão, para soluções saturadas foi menor que para as soluções com cerca de 60% de concentração de fertilizantes à base de amônia. Portanto, infere-se que quanto maior a concentração de fertilizante, mais rápido ocorre a formação do filme protetor de óxido de zinco, logo, o período de proteção do material é maior.

Por a solução sem adição de fertilizante (0 g/l) ser menos agressiva, há retardamento no tempo de formação desse filme protetor e, assim, a superfície metálica das amostras estaria exposta à corrosão durante mais tempo. Também deve-se ressaltar que, os valores de oxigênio dissolvido da água utilizada foram tipicamente corrosivos, segundo Roberge (2008), a corrosão em materiais metálicos pode ocorrer em águas e ambientes naturais se houver a presença de oxigênio dissolvido.

Outro fator que pode ter influenciado os valores da taxa de corrosão da solução sem adição de fertilizante serem muito próximos aos da concentração de 10 g/l, foi a limpeza realizada nas amostras.

Durante o procedimento de limpeza com amostras que não sofreram corrosão, foi observado a falta de padrão das mesmas, ou seja, alguns corpos de prova obtiveram valores de perda maiores ou menores que outros, obtendo um coeficiente de variação de 58 %. Devido a isso, estes foram descartados, e apenas incluídos aqueles que obtiveram um padrão, reduzindo o coeficiente de variação para aproximadamente 15 %. Sendo assim, o valor subtraído da perda de massa após a limpeza para os corpos de prova da solução sem adição de fertilizante poderia ser maior. Os dados desse procedimento estão apresentados no Anexo A.

A falta de padronização dos corpos de prova foi detectada ainda no início do experimento, pois grande parte do lote recebido foi descartado devido a desuniformidade da camada galvanizada. Estes são fatores imprevisíveis, pois o processo de galvanização a quente muitas vezes não é uniforme e cada amostra sofre o processo de uma maneira, assim como cada parte da tubulação. De acordo com Della Rovere et al. (2013), muitas vezes o processo de galvanização é realizado de forma incorreta, o que pode gerar rachaduras e falta de aderência na interface entre o metal base e o revestimento de zinco. Essas imperfeições afetam alguns pontos do objeto composto de aço galvanizado.

Dessa forma, é possível dizer que o processo de limpeza pode ter reagido diferentemente para cada corpo de prova, principalmente nos que estavam expostos à solução sem adição de fertilizante, os quais teoricamente estariam mais desprotegidos e sujeitos a perder mais material metálico que os que possuíam maior quantidade de produtos de corrosão.

A predição da perda de espessura de uma tubulação de aço galvanizado utilizada em um pivô central foi calculada baseada na taxa de corrosão média por ano de fertirrigação, apresentada na Tabela 11 e, por meio das Equações 2 e 3, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 12. É possível observar que a perda de espessura em 10 anos utilizando apenas irrigação ou irrigação alternada com fertirrigação foram praticamente iguais, cerca de 128 μm , pois as médias das taxas de corrosão foram muito próximas.

Os resultados obtidos por Eker e Yuksel (2005) mostraram que a diferença na perda de espessura do aço galvanizado, calculada a partir taxa de corrosão, para soluções com diferentes concentrações do mesmo fertilizante foi muito pequena, porém, houve diferença significativa na perda de espessura para a solução sem adição de fertilizante, diferentemente do resultado obtido nesta pesquisa.

Tabela 12 - Simulação da perda de espessura de uma tubulação de aço galvanizado utilizada em pivô central durante 10 anos de irrigação submetida a diferentes concentrações de fertilizante 20-00-20.

Tempo de fertirrigação e irrigação (anos)	Tempo (horas.ano)	Perda de espessura acumulada (μm)		
		0 g/l	5 g/l	10 g/l
1	735	34,805	35,592	35,043
2	1470	53,543	54,650	54,194
3	2205	69,453	70,991	70,200
4	2940	82,454	83,888	83,070
5	3675	93,809	95,063	94,380
6	4410	103,464	104,753	103,900
7	5145	110,778	111,882	111,231
8	5880	116,090	117,295	116,482
9	6615	121,881	123,072	122,130
10	7350	127,749	128,843	127,993

Legenda: Cada ano possui 735 horas de irrigação e fertirrigação.

Fonte: Do autor (2019).

Baseado na taxa de corrosão, é possível estimar a vida de uma tubulação. De acordo com Suzumura e Nakamura (2004), o revestimento de zinco, que fornece a proteção ao aço base, é corroído primeiramente e, somente depois o metal base começa a sofrer corrosão, a uma taxa menor que o revestimento de zinco. Entretanto, nem sempre a corrosão ocorre de forma uniforme, tornando difícil o cálculo da estimativa de vida. Sendo assim, o tempo que leva para somente a camada de zinco corroer seria uma estimativa conservadora.

Segundo Della Rovere et al. (2013), a camada de revestimento do aço galvanizado utilizado em tubulações de irrigação, possui uma espessura de cerca de 90 μm , e após esta camada ainda existem fases intermetálicas de Fe-Zn, que foram adquiridas com a alta temperatura do processo de galvanização.

Fundamentando-se na média da taxa de corrosão calculada para a solução sem adição de fertilizante, igual a 12,77 μm por ano de irrigação e, considerando a espessura do revestimento de zinco igual a 90 μm , é possível inferir que, este material teria no mínimo 7,05 anos de vida. Evidentemente, essa estimativa somente será real se a mesma operar durante esses anos de maneira exatamente igual à que foi simulada.

Analogamente, para a concentração de 5 g/l, que obteve a média de taxa de corrosão de 12,88 μm por ano de fertirrigação e irrigação, teria cerca de 6,99 anos de vida. E para a concentração de 10 g/l, com média de taxa de corrosão de 12,80 μm por ano de fertirrigação e irrigação, alcançaria mais ou menos 7,03 anos de vida.

De acordo com essas estimativas, seria interessante que a camada de revestimento de zinco tivesse pelo menos o dobro de espessura, para garantir uma estimativa de vida do material de pelo menos 15 anos.

Contudo, deve-se ressaltar que, esta simulação foi conduzida em uma situação de fluido estático, já que, mesmo com a recirculação das soluções não foi possível reproduzir a velocidade de escoamento que ocorre na tubulação lateral de um pivô central.

A tubulação lateral de um pivô central conduz o fluido sobre pressão e com velocidade média de 0,2 a 6 m/s, o que pode acelerar a corrosão. A temperatura também é maior no ambiente rural, pois as tubulações estão expostas a radiação solar. Neste experimento as variações da temperatura ambiente foram relativamente baixas, entre 17 e 25 °C. De acordo com Gentil (2011), em tubulações de aço galvanizado deve ser evitada a condução de fluidos a temperaturas entre 65 a 75 °C, pois nessa faixa a corrosão é mais intensa. Devido a isso, este parâmetro não possuiu grande influência sobre a corrosão ao longo da simulação.

Diante disso, considera-se que a temperatura no ambiente rural possa ser maior, assim como sua atmosfera fornece umidade e exposição constante às condições meteorológicas, as quais podem causar corrosão atmosférica na parte externa da tubulação (ROBERGE, 2008). Portanto, em situação de operação em campo, a corrosão externa pode ser acrescida a corrosão interna e gerar maior redução da vida do material.

Segundo Della Rovere et al. (2013), fluidos que possuem alta quantidade de sólidos em suspensão e são transportados em tubulações sob pressão, podem causar a remoção do filme protetor de óxido por erosão. Este processo de corrosão por erosão pode causar o aumento do desgaste das paredes internas do tubo, e conseqüentemente, maior penetração e perda de material metálico.

Sabendo-se que a velocidade de escoamento influencia o aumento da corrosão e que pode diminuir a quantidade de depósitos nos corpos de prova, infere-se que, tanto a taxa de corrosão quanto a perda de massa por área para a tubulação lateral do pivô central, possa ser ainda maior do que a estimada nesta pesquisa.

Mesmo que os resultados de taxa de corrosão por tempo das diferentes concentrações sejam muito próximos matematicamente, suas diferenças implicam em uma redução de vida do material, visto que, uma tubulação de aço galvanizado que transporte solução sem adição de fertilizante teria uma duração ligeiramente maior do que uma tubulação que conduzisse soluções de fertilizante 20-00-20. Lembrando que, os dados de estimativa de vida acima são somente para a camada de revestimento de zinco, e que, após seu desaparecimento, a taxa de

corrosão do metal base provavelmente seria maior para as soluções que contém adição de fertilizante.

Também é preciso destacar que o fertilizante utilizado é composto de fontes nitrogenadas e potássicas, as quais são consideradas menos causadoras de corrosão em contato com aço galvanizado. Sendo assim, fertilizantes com outras bases podem mudar os resultados que foram obtidos nesta pesquisa.

Além disso, é de suma importância avaliar que, em situações do dia a dia dos irrigantes, é possível que as fertirrigações tenham diferentes frequências, e que ocorra suplementações com outros tipos de fertilizantes no mesmo sistema de irrigação. Isso também pode influenciar o aumento da corrosão.

5 CONCLUSÃO

Levando em consideração os resultados obtidos nesta pesquisa, concluiu-se que:

- a) a perda de massa por área aumenta com a concentração de fertilizante e também com o tempo de contato da solução com a superfície metálica;
- b) a taxa de corrosão não diferiu estatisticamente entre as concentrações, possivelmente devido ao método utilizado para a limpeza dos produtos de corrosão, o qual removeu parte do material metálico;
- c) a vida do revestimento de zinco de uma tubulação que conduz solução sem a adição de fertilizante 20-00-20 é estimada em no mínimo 7 anos;
- d) a fertirrigação realizada com o fertilizante 20-00-20 causa aumento da corrosão em aço galvanizado utilizado em tubulações laterais de pivôs centrais.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; KELLER, J.; MARTIN, D. **Center Pivot System Design**. Falls Church,VA: Irrigation Association, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 1-03**: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. West Conshohocken, 1999.
- 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.
- AZEVEDO, S. M. et al. Corrosion mechanisms of Zn(Mg, Al) coated steel in accelerated tests and natural exposure: 1. The role of electrolyte composition in the nature of corrosion products and relative corrosion rate. **Corrosion Science**, v. 90, p. 472-481, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2014.05.014>>. Acesso em: 27 ago. 2018.
- BARBOSA, J.C.; MALDONADO JUNIOR, W. **AgroEstat - sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2015.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed., atual. e ampl. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2006.
- BIGONI, R. et al. Drinking water quality assessment and corrosion mitigation in the hospital water supply system of Chacas Village (Peru). **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 9, n. 3, set. 2014. Disponível em: <doi: 10.4136/ambi-agua.1407>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- BORGES, A.L.; SILVA, D.J. Fertilizantes para fertirrigação. In: BORGES, A.L.; COELHO, E.F. **Fertirrigação em fruteiras tropicais**. 2 ed. rev e amp. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2009. cap. 2, p.20-37. Disponível em:<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/658447/1/Fertirrigacao2009.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2018.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma Introdução**. 8ª edição. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.
- COLOMBO, A.; OLDANI, L.; TRASATTI, S. P. Corrosion failure analysis of galvanized steel pipes in a closed water cooling system. **Engineering Failure Analysis**, v. 84, p. 46-58, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.10.008>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- COSTA, E. F.; BRITO, R. A. L. **Aplicador portátil de produtos químicos via água de irrigação**. Sete Lagoas, MG: Embrapa, 1998 (Circular técnica 13).

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, jul. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.06.024>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

DILER, E. et al. Characterization of corrosion products of Zn and Zn-Mg-Al coated steel in marine atmosphere. **Corrosion Science**, v. 87, p. 111-117, jun. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.017>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

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

EMBRAPA. **Brasil está entre os países com maior área irrigada do mundo**. 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/12990229/brasil-esta-entre-os-paises-com-maior-area-irrigada-do-mundo>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

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

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

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Consulta dados da Estação Convencional: LAVRAS (MG)**. 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/dspDadosCodigo.php?ODM2ODc=>>>. Acesso em: 30 dez. 2018.

JIANG, C.; WU, C.; JIANG, X. Experimental study on fatigue performance of corroded high-strength steel wires used in bridges. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 681-690, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.249>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: The Blackburn Press, 1990.

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

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

MORENO, M. A. et al. Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 112-121, fev. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.016>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

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

PAULINO, J. et al. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, abr./jun. 2011.

RÊGO, C. E. do. et al. Utilização da caracterização microestrutural para avaliar oxidação precoce em alças de granadas não letais fabricadas de aço carbono galvanizado. **Cadernos UniFOA**. Edição especial do curso de mestrado profissional em materiais, out. 2011. Disponível em: <<http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/cadernos/article/view/1143/1033>>. Acesso em: 07 abr. 2018.

ROBBINS, J. W. D.; HEERMANN, D. F.; SNEED, R. E. Agricultural Sprinkler Irrigation Systems. In: STETSON, L.E.; MECHAM, B.Q. Irrigation association. **Irrigation**. 6. ed. Falls Church, VA: Irrigation Association, 2011. p. 786 – 798.

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

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

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, jan. 2015. Disponível em: < DOI 10.1007/s11668-015-9930-y>. Acesso em: 02 fev. 2018.

SHIBLI, S. M. A.; MEENA, B. N.; REMYA, R. A review on recente approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process. **Surface & Coatings Technology**, v. 262, p. 210-215, dez. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.054>>. Acesso em: 17 jan. 2018.

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

SUZUMURA, K.; NAKAMURA, S. Environmental factors affecting corrosion of galvanized steel wires. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, p. 1-7, jan./fev. 2004. Disponível em:<[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:1\(1\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:1(1))>. Acesso em: 23 ago. 2018.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. **Engenharia de Irrigação: tubos e acessórios**. Campinas, SP. Unicamp/Faculdade de Engenharia Agrícola, 2015. Disponível em: <https://www.feagri.unicamp.br/irrigacao/index.php?option=com_attachments&task=download&id=31>. Acesso em: 01 dez. 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. DMA - Diretoria de Meio Ambiente. **Setor de Tratamento de Água**. 2019. Disponível em: <<http://www.dma.ufla.br/site/coordenadorias/saneamento/tratamento-de-agua/>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

VALLEY: GROWING THE CONVERSATION. **Do your center pivot pipelines last as long as they could?**. 2016. Disponível em: < <http://blog.valleyirrigation.com/valley-irrigation/au/resources/growing-the-conversation-blog/blog-home/do-your-centre-pivot-pipelines-last-as-long-as-they-could>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

ANEXO A

Para o cálculo da perda de massa corrigida foi necessário realizar o procedimento de limpeza com corpos de prova que não passaram pelo processo de imersão, a fim de eliminar qualquer perda de material metálico que pudesse ser retirado durante a limpeza. Na Tabela A.1, estão apresentados os dados e a média da massa perdida durante o processo de limpeza, esse valor médio foi decrescido da perda de massa após a retirada dos produtos de corrosão.

Tabela A 1 - Média da quantidade de material metálico perdido durante o processo de limpeza.

Arruela	Ensaio de limpeza de arruelas novas		
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)
1	15,6133	15,5527	0,0606
2	15,7324	15,6576	0,0748
3	15,4066	15,3525	0,0541
4	15,6421	15,5817	0,0604
5	15,714	15,6484	0,0656
6	15,7928	15,7263	0,0665
7	15,8739	15,8156	0,0583
8	15,6542	15,5801	0,0741
9	15,5917	15,5305	0,0612
10	15,6313	15,5576	0,0737
11	15,7866	15,7175	0,0691
12	15,7515	15,6756	0,0759
13	15,5311	15,4612	0,0699
14	15,5106	15,4363	0,0743
15	15,5777	15,504	0,0737
16	15,6465	15,5991	0,0474
17	15,6966	15,641	0,0556
18	15,5663	15,5296	0,0367
19	15,7418	15,6798	0,062
20	15,6958	15,6257	0,0701
21	15,7418	15,6798	0,062
	Média		0,0641
	Desvio Padrão		0,0096
	CV (%)		14,98

Fonte: Do autor (2019).