

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

ANÁLISE DE CORROSÃO EM CONEXÕES E TERMINAIS DE MANGUEIRAS
HIDRÁULICAS EM SEMEADORAS DE GRÃOS

João Osvaldo Manske Lammel

Trabalho de Diplomação

Orientadora: Professora Dra. Célia Malfatti
Coorientador: Dr. Victor Velho de Castro

Porto Alegre
2023

CIP - Catalogação na Publicação

Manske Lammel, João Osvaldo
ANÁLISE DE CORROSÃO EM CONEXÕES E TERMINAIS DE
MANGUEIRAS HIDRÁULICAS EM SEMEADORAS DE GRÃOS / João
Osvaldo Manske Lammel. -- 2023.
56 f.
Orientadora: Célia de Fraga Malfatti.

Coorientador: Victor Velho de Castro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. corrosão por fertilizantes. 2. semeadoras de
grãos. 3. aços ao carbono. 4. aços inoxidáveis. 5.
agricultura. I. de Fraga Malfatti, Célia, orient. II.
Velho de Castro, Victor, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

base de tudo.

Dedico esta dissertação à minha família, o meu alicerce, a

AGRADECIMENTOS

Professora Dra. Célia Malfatti, pela orientação neste trabalho desafiador, e inspiração em outros diversos momentos da jornada acadêmica.

Dr. Victor Velho de Castro, pelo grande apoio técnico e emocional, além da inspiração através do seu amor pela pesquisa.

Minha namorada e companheira de vida, Nicole Cavalli, pelo apoio, força e paciência durante todo o processo.

Minha família por todo o apoio financeiro, emocional e afetivo durante todo o período da graduação.

Meu amigo e engenheiro metalúrgico Rômulo Fernando Guerra Rigoni, pelos conselhos profissionais e pessoais, além da experiência metalúrgica transmitida durante meu período de iniciação científica.

Meu amigo e engenheiro mecânico Eduardo Luiz Balzan, pelos ensinamentos em hidráulica, agricultura e implementos agrícolas, além do suporte e auxílio para obtenção das amostras para a realização deste trabalho.

Meu amigo e engenheiro mecânico Luiz Gustavo Garcia, pelo incentivo, apoio e flexibilidade durante todo o período de estágio e etapa final para execução deste presente trabalho.

Arnaldo Almeida, da Hansa-Flex do Brasil, pelo suporte e fornecimento de amostras para a realização deste trabalho.

Ao time de Plantadeiras (Crop Care) da AGCO do Brasil, pelo fornecimento de amostras, de informações e de suporte técnico.

Aos laboratórios LAPEC e LAMEF, pela acolhida e auxílio na realização dos testes propostos.

Ao CNPq, FINEP, FAPERGS pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos	4
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Semeadora-Adubadora de Grãos	5
3.1.1 Classificação	5
3.2 Fertilizantes Mistos	7
3.3 Elementos Hidráulicos	9
3.3.1 Mangueiras Flexíveis	9
3.3.2 Conexões Hidráulicas	11
3.4 Aços Baixo Carbono	12
3.4.1 Revestimentos/Galvanização	13
3.5 Aços Inoxidáveis	15
3.6 Corrosão	17
3.6.1 Corrosão em Aços ao Carbono	19
3.6.2 Corrosão em Aços Inoxidáveis Austeníticos	21
3.7 Técnicas Eletroquímicas	22
3.7.1 Curvas de Polarização	23
4.0 MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 Amostras Utilizadas	25
4.1.1 Espectrometria de Emissão Ótica	27
4.1.2 Metalografia	28
4.1.3 Análise do produto de corrosão	29
4.1.4 Ensaio Eletroquímico de Polarização Potenciodinâmica	29
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1 Caracterização Metalúrgica	31
5.1.1 Espectrometria de Emissão Ótica	31
5.1.2 Análise Metalográfica	32

5.2	Análise do produto de corrosão	36
5.3	Ensaio Eletroquímico de Polarização Potenciodinâmica.....	37
5.4	Relação de Custo-benefício	40
6.0	CONCLUSÕES	42
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
8.0	REFERÊNCIAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Semeadora Massey Ferguson/Fendt/Valtra Momentum, fabricada pela AGCO.	3
Figura 3.1: Semeadora-adubadora <i>Fendt Momentum</i>	7
Figura 3.2: Fertilizante NPK <i>Yara</i> [®] 2-23-23.....	8
Figura 3.3: Desenho esquemático de uma mangueira hidráulica flexível de terminais prensados.	9
Figura 3.4: Tubo flexível SAE 100R17.....	10
Figura 3.5: Desenho esquemático de vedação de face plana, sendo “D.E.” o diâmetro externo e “D.I.” o interno.	11
Figura 3.6: Desenho esquemático de um adaptador.	11
Figura 3.7: Tipos de conexões hidráulicas.	12
Figura 3.8: Diagrama Fe-C.....	13
Figura 3.9: Diagrama Fe-Cr.....	16
Figura 3.10: Lupa Austenítica.	16
Figura 3.11: Diagrama de equilíbrio Fe-Ni.	17
Figura 3.12: Variação da taxa de corrosão em função da presença de SO ₂ (1 unidade de SO ₂ é equivalente à leitura média diária em g de SO ₂ por m ³ de ar).....	20
Figura 3.13: Arranjo esquemático para levantamento de curvas de polarização.	23
Figura 3.14: Extrapolação das retas de Tafel.	24
Figura 4.1: Diagrama dos métodos aplicados e os resultados esperados.	25
Figura 4.2: Desenho esquemático da separação das amostras.....	26
Figura 4.3: Amostras recebidas de campo.....	27
Figura 4.4: Amostras novas recebidas. A) TNI; B) TNZ.	27
Figura 4.5: Amostra 02 subdividida em C2-A e T2-A, conforme nomenclatura utilizada.	28

Figura 4.6: Amostra 02 subdividida em C2-B e T2-B, conforme nomenclatura utilizada.....	28
Figura 4.7: Instrumentação utilizando fita galvânica, com um d=6,5 mm na área exposta.	30
Figura 5.1: Amostra retirada de campo em aço ao carbono, com 100 vezes de aumento: Matriz ferrítica (branco) e pequenas quantidades de perlita (escuro), com grande quantidade de sulfetos.....	33
Figura 5.2: Amostra retirada de campo em aço ao carbono, com 500 vezes de aumento: Grande quantidade de sulfetos devido ao alto teor de enxofre dos aços <i>SAE/AISI 1215</i> .	33
Figura 5.3: Amostra nova em aço ao carbono, com 100 vezes de aumento: Matriz ferrítica (branco) e perlita (escuro).....	34
Figura 5.4: Amostra nova em aço ao carbono, com 500 vezes de aumento: Matriz ferrítica (branco), perlita (escuro) e inclusões de sulfetos (cinza).	34
Figura 5.5: Amostra nova em aço inoxidável, com 100 vezes de aumento: O ataque realizado com ácido oxálico não foi realizado de maneira adequada, indicado pelos pites (pontos escuros).....	35
Figura 5.6: Amostra nova em aço inoxidável, com 500 vezes de aumento: Evidencia-se os pites de corrosão devido ao ataque químico realizado de forma inadequada.....	35
Figura 5.7: Composição dos produtos de corrosão de amostras de campo.	36
Figura 5.8: Curvas de polarização obtidas durante ensaios. As curvas apresentadas são referentes às maiores taxas de corrosão encontradas para cada material.	37
Figura 5.9: Representação de recomendações do fornecedor Hansa-Flex, conforme norma DIN-20066.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Relação de amostras recebidas.	26
Tabela 4.2: Reagentes utilizados no ataque químico.....	29
Tabela 5.1: Composição química obtida na espectrometria (% em peso).....	31
Tabela 5.2: Identificação dos aços estudados conforme norma SAE/AISI.....	32
Tabela 5.3: Potencial (E) de corrosão, corrente (i) de corrosão, densidade de corrente (J) e taxa de corrosão obtidos.....	39
Tabela 5.4: Cotação de componentes pela Hansa-Flex.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

SPD – Sistema de plantio direto.

SPC – Sistema de plantio convencional.

NPK – Fertilizante misto a base de Nitrogênio, Fósforo e Potássio.

ha – hectare.

Socketless – Sem soquete, porca.

Nipple – Protusão no terminal da mangueira onde o tubo flexível é montado.

ORFS - Em inglês “O-ring face seal”, traduzido como anel de vedação de face plana.

ORB – Em inglês “O-ring boss”, traduzido como anel de vedação de ressalto.

JIC 37° Flare Fitting – *Joint Industry Council*, vedação com anel num ressalto de 37° de ângulo.

AISI – American Iron and Steel Institute.

SAE – Society of Automotive Engineers.

E_{Corr} – Potencial de corrosão [V].

i_{Corr} – Corrente elétrica de corrosão [A].

J_{Corr} – Densidade de corrente elétrica de corrosão [A/cm²].

MEV – Microscopia eletrônica de varredura.

EDS – Espectroscopia por energia dispersiva.

ECS – Eletrodo de calomelano saturado.

RESUMO

A corrosão, de maneira geral, é um dos problemas mais estudados na área metalúrgica, devido aos grandes prejuízos financeiros ocasionados. No meio agrícola, a utilização de fertilizantes NPK (nitrogênio, fósforo e potássio) para suplementação de solos vem crescendo nas últimas décadas, bem como, a utilização de semeadoras adubadoras de grãos de precisão. Essas máquinas são constituídas de extensos e complexos sistemas hidráulicos, os quais são formados por elementos como mangueiras flexíveis, tubos rígidos, conexões e adaptadores, entre outros. Os processos corrosivos nos aços utilizados em conexões e terminais hidráulicos ocorrem de maneira agressiva, podendo ocasionar paradas para manutenção de semeadoras em momentos inoportunos, como em períodos ideais de plantio. No presente trabalho, buscou-se determinar as taxas de corrosão dos materiais comumente utilizados na fabricação de terminais de mangueiras hidráulicas e conexões (aço *SAE/AISI 1215, 1010* com revestimento Zinco-Níquel e aço inoxidável *SAE/AISI 316L*), empregando para isso, ensaios eletroquímicos. Para avaliar o processo de corrosão gerado em campo, foram coletadas e caracterizadas amostras corroídas as quais estavam em uso na semeadora, que operava utilizando o fertilizante misto NPK. Para realização dos ensaios eletroquímicos, foi empregada a técnica de polarização potenciodinâmica, em uma célula de 3 eletrodos, utilizando como eletrólito uma solução contendo o fertilizante NPK 02-23-23 diluído a 1% em massa em água deionizada. A partir das curvas de polarização obtidas, foram calculadas as taxas de corrosão para cada material testado neste meio específico, a partir das *retas de Tafel* obtidas via software *NOVA 2.1*. As amostras coletadas em campo foram analisadas quanto à morfologia e microestrutura e composição química (tanto no substrato quanto produtos de corrosão), utilizando técnicas de análise metalográfica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e detecção de energia dispersiva (EDS). Os resultados obtidos indicam um desempenho superior do aço inoxidável nessas condições. Porém é preciso levar em consideração que a seleção do material a ser empregado nos terminais de mangueiras hidráulicas e conexões deve considerar também a vida útil de uma mangueira hidráulica que depende do tempo de operação do tubo flexível, recomendado por cada fabricante.

ABSTRACT

Corrosion, in general, is one of the most studied issues in the metallurgical field due to the significant financial losses it may cause. In agriculture, the use of NPK fertilizers (Nitrogen, Phosphorus, and Potassium) for soil supplementation has been increasing in recent decades, along with the use of precision grain seeders. These machines are based on extensive and complex hydraulic systems, composed of elements such as flexible hoses, rigid pipes, fittings, and adapters, among others. Corrosive processes in the steels used in hydraulic connections and terminals can be evident aggressively, leading to unwished maintenance from seeders, often occasioned during planting periods. In this study, the aim was to determine the corrosion rates of materials commonly used in the manufacturing of hydraulic hose terminals and connections (*SAE/AISI* 1215 steel, *SAE/AISI* 1010 steel with Zinc-Nickel coating, and stainless-steel *SAE/AISI* 316L) based on electrochemical tests. To evaluate the corrosion process that occurs in the field, corroded samples being used on the seeder and operating with the mixed NPK fertilizer, were collected and characterized. For the electrochemical tests, the potentiodynamic polarization technique was employed in a three-electrode cell, using an electrolyte solution containing the NPK 02-23-23 fertilizer diluted to 1% by weight in deionized water. Corrosion rates for each material tested in this specific environment were calculated from the polarization curves obtained through the NOVA 2.1 software. Field-collected samples were analyzed concerning morphology, microstructure, and chemical composition (both in the substrate and corrosion products) using metallographic analysis techniques, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The results obtained indicate a greater performance of stainless steel in these conditions. However, it is essential to consider that the material selection for hydraulic hose terminals and connections should also consider the hose's service life, which depends on the recommended operating time specified by each manufacturer.

1.0 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico na área agrícola no Brasil, especialmente no segmento de plantio e colheita de grãos, tem evoluído de maneira constante desde meados dos anos 1970. De acordo com Scolari (2006), os avanços observados no setor agrícola nacional foram propiciados primordialmente através de avanços tecnológicos, seguidos do uso de diferentes compostos químicos que aprimoraram o manejo da terra, tais como calcário, fertilizantes e insumos químicos. Como abordado por Da Silva *et al.* (2009) o Sistema de Plantio Direto (SPD), no Brasil, teve seu início em meados da década de 70, na região Sul. O objetivo principal era reduzir a erosão do solo e minimizar impactos ambientais provenientes do sistema de cultivo convencional, pois o binômio trigo-soja, com uso de fogo para eliminar os restos culturais e semear a soja provocava grandes estragos. Essa prática, aliada a arações e gradagens, culminava no aumento dos problemas de erosão, de infiltração e do escoamento superficial das águas, com a conseqüente perda de nutrientes do solo e queda da produtividade agrícola. Seguindo caminhos semelhantes, um dos pontos críticos para adoção do plantio direto está possivelmente relacionado à simplificação do processo de semeadura, sem a necessidade de lavragem do solo (GASSEN, 2010). Em pequenas propriedades rurais que utilizam o SPD observam-se resultados consideráveis, com uma entrada líquida de 1 a 2,87 mil dólares ha⁻¹ ano⁻¹, significando aumento de 35 a 236% em relação ao Sistema de Plantio Convencional (SPC), que utiliza aração ou gradagem (DA SILVA *et al.*, 2009). Outras vantagens do SPD são: diminuição drástica da erosão do solo, aumento da infiltração da água da chuva, melhora nas características químicas, físicas e biológicas do solo, assim tem-se diminuição dos custos de produção, dos impactos ecológicos ocasionados pelo SPC, como a sedimentação de arroios, rios, lagos, entre outros. (DA SILVA *et al.*, 2009). Outro fator importante que contribui para o uso majoritário do plantio direto é exposto por Fernandes H. C. *et al.* (2008), onde foram encontradas reduções de 50% no custo energético total das operações em relação ao SPC.

Além dos avanços no manejo do solo, a evolução tecnológica das semeadoras de grão são parte importante para o aumento de produtividade. No sistema SPD, as semeadoras-adubadoras de plantio direto desempenham funções de cortar a palha; abrir um sulco no solo e depositar adubo e semente à profundidade e à distância apropriados, na quantidade pré-

estabelecida, segundo necessidade da cultura. (FONSECA, 1997; RIBEIRO, 1998). As semeadoras-adubadoras podem ser providas de diferentes mecanismos dosadores de sementes, sendo os mais utilizados: disco perfurado, rotor acanalado, dedo prensor, copo distribuidor e dosador pneumático. Geralmente, nas semeadoras-adubadoras mais novas estes mecanismos estão posicionados próximo ao solo, fazendo com que as sementes, após serem dosadas, tenham de percorrer uma pequena distância em queda livre, dentro de um tubo condutor, até o solo. Conforme Rocha *et al.* (1998), a altura de queda das sementes afeta o desempenho dos mecanismos dosadores de sementes.

Como consequência, empresas do setor agrícola iniciaram uma nova fase de desenvolvimento de máquinas baseadas nesta nova forma de cultura, onde foram prezadas a eficiência no plantio e colheita e a minimização de danos ao solo e ao meio ambiente, o que ficou popularmente conhecida como agricultura de precisão.

Devido às novas necessidades, tais máquinas de plantio e colheita sofreram diversas evoluções tecnológicas, visando além de uma maior eficiência de “sacas de grãos por hectare”, a qualidade dos grãos no plantio e colheita. A partir disso, conforme Scolari (2006), a indústria nacional tem ampla capacidade em fabricar maquinários e implementos agrícolas para suprir as demandas do país, além de possibilitar excedentes para exportação, garantindo opções de compra para os agricultores de diferentes lugares do mundo e regiões do Brasil.

Nesse aspecto, as semeadoras de grãos, popularmente conhecidas como “plantadeiras”, possuem um papel importante no ciclo de cultura de grãos. Uma vez que o plantio é realizado de maneira correta e precisa, no período correto do ano, a probabilidade de obter-se um produto de maior qualidade, cresce.

A grande quantidade de sistemas de controle de qualidade no plantio, que objetivam uma maior produtividade no campo, elevou o patamar de complexidade do maquinário, proporcionando uma série de funcionalidades. Entre eles, sistemas de ajuste de profundidade em que a semente é depositada, de balanceamento de peso da máquina, de levante de plataforma para transporte, elevação das linhas, entre outros. Essas características permitem que haja um maior controle do operador sobre o plantio além de reduzir significativamente problemas como a compactação de solo e falta de profundidade das sementes. O ponto em comum de todos esses sistemas é que são alimentados por sistemas hidráulicos e/ou pneumáticos.

A Figura 1.1 expõe a complexidade destes sistemas; a plantadeira *Momentum* (fig.1.1), fabricada pela empresa AGCO, comercializada em várias marcas do grupo, é um exemplo da relevância da hidráulica mobil na agricultura atualmente; são mais de 100 mangueiras flexíveis, além de tubos, blocos de comando, entre outros. Estes componentes, com ênfase nas mangueiras hidráulicas flexíveis, são compostos por partes metálicas, que devido à utilização de fertilizantes durante o plantio das sementes, sofrem corrosão sob taxas significativas. Chamadas de perdas indiretas, podem totalizar custos mais elevados que as perdas diretas, pois sua quantificação nem sempre é simples (GENTIL, 2011).



Figura 1.1: Semeadora Massey Ferguson/Fendt/Valtra Momentum, fabricada pela AGCO. Fonte: Massey Ferguson, 2023. Disponível em: www.masseyferguson.com. Acesso em Julho de 2023.

No meio agrícola, interrupções durante uma janela de cultura ou plantio, costumam ser decisivas no resultado de uma safra. As culturas de grãos possuem, biologicamente, uma faixa de tempo restrita no ano para o seu plantio, o que gera uma grande preocupação quanto a paradas para manutenção. Logo, manutenções em semeadoras, especificamente tratando de sistemas hidráulicos devido a sua grande quantidade de componentes, torna-se crucial para uma produção ideal de grãos.

A escolha correta dos materiais com os quais são fabricados os elementos hidráulicos expostos à atmosfera, pode reduzir custos de manutenção e maximizar a produção por hectare. O presente trabalho, visa avaliar o comportamento em corrosão dos materiais mais empregados na fabricação de terminais e conexões hidráulicos, bem como, avaliar o processo corrosivo em amostras retiradas de equipamentos em operação campo.

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o processo de corrosão em conexões e terminais de mangueiras hidráulicas na semeadora de grãos *Momentum* e verificar o comportamento de diferentes ligas para esta aplicação.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar os processos de corrosão de amostras retiradas de equipamento operando em campo.

Avaliar por ensaio eletroquímico (em bancada) a taxa de corrosão três diferentes materiais: aço SAE 1110, SAE 1110 com revestimento Zinco-Níquel e aço inoxidável AISI 316, em um meio aquoso contendo o fertilizante NPK 02-23-23.

Determinar a taxa de corrosão desses três materiais (a partir do ensaio eletroquímico) e estimar a viabilidade econômica na aplicação em conexões e terminais hidráulicos da semeadora *Momentum*.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Semeadora-Adubadora de Grãos

Semeadoras-adubadoras são máquinas construídas para efetuar a semeadura de espécies vegetais que se reproduzem por sementes, isto é, para depositar as sementes no solo a uma profundidade predeterminada de acordo com a planta cultivada, e distribuir também os fertilizantes (SENAR, 2017). O tamanho destas varia conforme as opções disponíveis no mercado, usualmente definido pelo número de linhas; a capacidade de plantio é variável, possuindo tanques de sementes e fertilizantes proporcionais ao número de linhas. No meio agrícola, é comum classificar as máquinas a partir de diferentes fatores, conforme os seguintes tópicos.

3.1.1 Classificação

Semeadoras podem ser classificadas de diferentes formas, conforme o Serviço Nacional de Aprendizagem Agrícola (SENAR), se dividindo de acordo com sua mecanização e regulagem. Possíveis classificações de semeadoras conforme SENAR (2017):

A) Quanto à forma de acionamento

São definidas de acordo com a força motriz do implemento, subdivididas em acionamento manual, de tração animal e tratorizado. Para o primeiro caso, o acionamento manual, ou seja, realizado pelo homem, é utilizado em propriedades de pequeno porte, e, ou, em localidades onde o relevo do terreno dificulta ou impossibilita a utilização de tratores ou tração animal. Na tração animal, são utilizadas espécies como bois, mulas ou cavalos; tendo como característica um baixo rendimento, é raramente empregada, apenas em propriedades de pequeno porte. Já a forma mecanizada, ou tratorizada, o deslocamento da semeadora é realizado por tratores, sendo acoplada ao sistema de levante hidráulico da máquina ou à barra de tração.

B) Quanto à distribuição e tamanho de sementes

A exigência de espaçamento uniforme entre as sementes é variável conforme o tipo de cultura empregado, categorizando as semeadoras como de precisão, de fluxo contínuo e a lanço (área e terrestre). Para o caso de grãos graúdos, como soja, milho e feijão, recomenda-

se a utilização de semeadoras de precisão, buscando uniformidade de espaçamento entre as linhas. A distância entre as sementes deve ser determinada após análise das características e disponibilidade de água do solo em que será realizado o plantio. Já em semeadoras de fluxo contínuo, usualmente são utilizadas para a semeadura de grãos miúdos, tais como arroz, trigo e cevada. O espaçamento das linhas para este caso varia conforme o número de linhas de plantio da máquina, sendo possível o ajuste de distância para valores definidos pelo fabricante. O terceiro tipo é chamado de “a lanço”, onde as sementes são lançadas na superfície do solo, seguido de trabalho com grade leve, sendo área quando não há controle de altura da deposição, e terrestre quando há uma menor distância do solo.

C) Quanto ao mecanismo dosador de sementes

Nas semeadoras, existem opções de mecanismos de dosagem de sementes, e a escolha destes envolve fatores como custo, tamanho dos grãos e distribuição de sementes. Nas semeadoras de precisão e de fluxo contínuo, podem ser utilizados discos perfurados horizontais ou verticais para a dosagem de sementes, manual ou pneumático. Em casos de menor precisão, como nas semeadoras a lanço, é utilizado um rotor centrífugo, que realiza o lançamento das sementes no solo.

Além de depositarem o fertilizante juntamente com as sementes, as semeadoras mais avançadas possuem uma série de funcionalidades que possibilitam um maior controle dos mecanismos responsáveis pelas funções citadas. Utilizando como exemplo, temos a plantadeira *Fendt Momentum* (Figura 3.1) que possui sistemas como o *Delta Force*®, que a partir de um sistema de cilindros hidráulicos, cria uma força descendente específica para cada linha, ajustando a pressão certa para diferentes tipos de solo e condições de plantio (FENDT INTERNATIONAL | THE AGRICULTURAL MACHINERY MANUFACTURER, [s. d.]). No quesito de preparo do solo para a semeadura, a semeadora possui uma unidade de linha, que compreende um mecanismo de dosagem de sementes, tubo de sementeira, rodas medidoras, gerenciador de resíduos, disco de preparo do solo (FENDT INTERNATIONAL | THE AGRICULTURAL MACHINERY MANUFACTURER, [s. d.]). Juntamente com os sistemas hidráulicos responsáveis pela distribuição de peso, controle de pressão dos pneus, é possível um ajuste fino das condições de plantio, evitando problemas comuns como a compactação do solo.



Figura 3.1: Semeadora-adubadora *Fendt Momentum*.

Fonte: Lectura Specs. Disponível em: <https://www.lectura-specs.es/es/modelo/maquinaria-agricola/semadoras-fendt/momentum-18-11756129>. Acesso em Julho de 2023.

3.2 Fertilizantes Mistos

A utilização de fertilizantes na agricultura Brasileira vem se tornando essencial para o desenvolvimento na produção. Diante disso, Profeta e Braga (2011) apontam que juntamente com o uso de máquinas agrícolas de precisão, sementes melhoradas, defensivos agrícolas e corretivos de solo, o país possui um sistema produtivo competitivo com o mercado internacional. De acordo com Silverol (2006), a utilização de fertilizantes ocorre por conta das restrições que solos brasileiros possuem em relação à agricultura, uma vez que sofrem de intensas chuvas devido ao clima tropical, lixiviando macro e micronutrientes. Ainda, o autor destaca que para a viabilidade da produção agrícola em grande escala, é necessário a utilização de fertilizantes contendo macro e micronutrientes indispensáveis ao desenvolvimento das plantas (SILVEROL, 2006).

Conforme as Instruções Normativas do Ministério da Agricultura e da Pecuária (IN MAPA), são considerados fertilizantes toda e qualquer substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes de plantas. A partir deste conceito básico, derivam subespécies, de acordo com sua origem, sendo elas orgânica e mineral, ou mistos. De acordo com Sanches (2007), os elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas são chamados de macronutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Já os principais micronutrientes, segundo Havlin *et al.* (2016), são: boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, níquel e zinco.

No que tange a classificação dos fertilizantes, descreve-se:

Existem diferentes tipos de fertilizantes, sendo eles minerais e orgânicos. Dentro dos minerais, eles são subdivididos em nitrogenados, fosfatados e potássicos, sendo compostos essencialmente de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente. Uma outra classe são os fertilizantes mistos, que são uma combinação dos três últimos citados e são, usualmente, chamados de NPK. (SANCHES, 2017).

A composição destes fertilizantes, também chamada de fórmula, não é fixa, variando o percentual de cada elemento, orientadas pelos teores dos nutrientes determinados na análise de solo (EMBRAPA SOJA, 2001/2002). Nesse sentido analisa-se:

Existem diferentes tipos de fertilizantes e de fórmulas quanto à granulometria ou seja, o tamanho de partículas de seus componentes: granulado e mistura granulada, mistura de grânulos, microgranulado, pó, farelado fino, farelado e farelado grosso. O fertilizante granulado e a mistura granulada é o produto constituído de partículas em que cada grânulo contém os elementos declarados ou garantidos do produto. Já a mistura de grânulos é o produto em que os grânulos contém, separadamente ou não, os elementos declarados ou garantidos do produto. (ESPÍNDOLA; LUIS, 2011)

Como explicado por Espíndola e Luis, (2011) , as fórmulas do tipo NPK corresponde à concentração em percentual dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) presentes na mistura, conforme exemplificado na Figura 3.2.

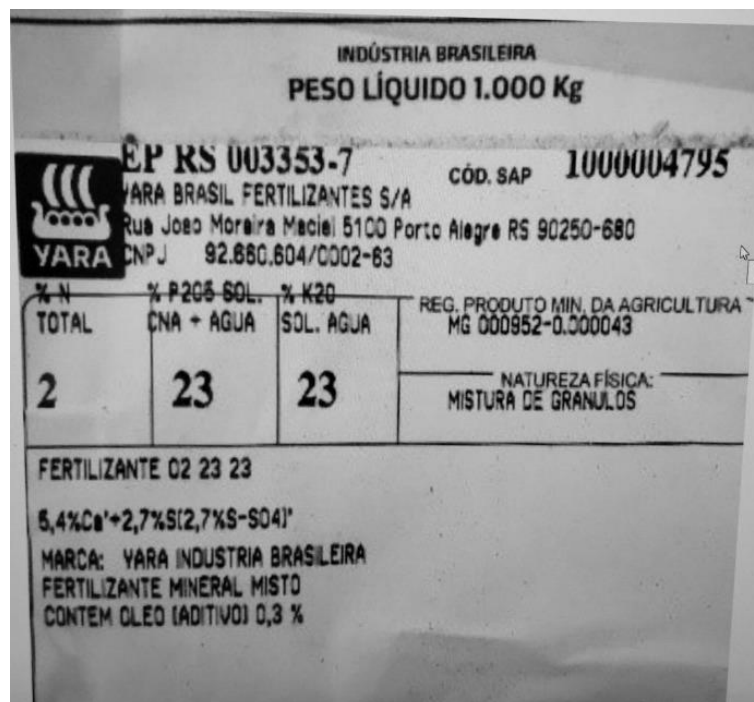


Figura 3.2: Fertilizante NPK Yara[®] 2-23-23.

Fonte: Autor, 2023.

Nos processos de seleção e cálculo de fórmula de fertilizantes, além do conhecimento do solo e da cultura que será realizada, o modo de aplicação deles é um ponto importante a ser

considerado, pois os nutrientes, dependendo da fórmula selecionada, poderão ter uma baixa solubilidade em água, inviabilizando o processo de fertirrigação, por exemplo, podendo então ser apenas aplicado sólido.

3.3 Elementos Hidráulicos

Os sistemas hidráulicos são muito diversos e complexos, já que as aplicações de condução interagem entre si. Enquanto a escala do sistema aumenta, o número de juntas hidráulicas fica mais alto (AWAD; ALKELANI, 2012). Os tipos de elementos utilizados são definidos especificamente conforme as condições operacionais do sistema (pressão, vazão, temperatura), ocorrendo em junta de tipo tubo a tubo, mangueira a tubo, conexão a tubo ou mangueira a conexão (AWAD; ALKELANI, 2012). Destacam-se os três tipos mais utilizados em linhas hidráulicas: tubos (rígidos), *tubings* (semi-rígidos), e mangueiras (flexíveis).

3.3.1 Mangueiras Flexíveis

Com avançados sistemas hidráulicos sendo projetados e desenvolvidos a cada dia em mais alta potência para equipamentos de alta pressão, a importância de alta qualidade, flexibilidade e durabilidade do conjunto de mangueiras hidráulicas nunca foi tão crítico (CATÁLOGO GATES, 2019). As mangueiras, nos sistemas hidráulicos, são elementos de ligação flexível entre dois pontos com a função de transportar fluídos (PERES, 2013). A Figura 3.3 ilustra uma mangueira flexível com terminais prensados (crimpados), que são o objeto de estudo deste trabalho.

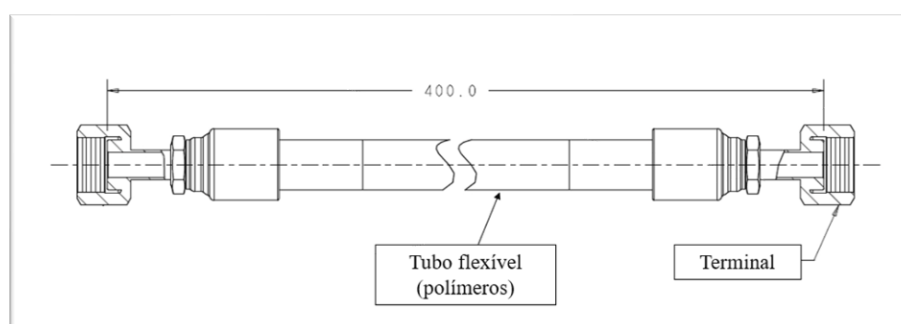


Figura 3.3: Desenho esquemático de uma mangueira hidráulica flexível de terminais prensados.

Fonte: Autor, 2023.

Os tubos flexíveis são classificados de acordo com normas técnicas nacionais e globais, possuindo diferentes classes de acordo com os números de tramas ou número de espirais. A Figura 3.4, exemplifica uma mangueira flexível classe SAE 100R17, conforme modelo do fabricante Gates. A classe do elemento flexível é variável de acordo com as condições de

operação do sistema, tais como pressão, temperatura, raio de dobra etc. No quesito temperatura de operação, na escolha da mangueira, deve ser escolhida considerando a temperatura do fluido e a temperatura do ambiente (CATÁLOGO GATES, 2019).



Figura 3.4: Tubo flexível SAE 100R17.

Fonte: Catálogo Gates. Disponível em:

https://www.gatesbrasil.com.br/upload/catalogos/catalogo_hidraulica_2019_web.pdf. Acesso em Julho de 2023.

Os terminais metálicos de mangueiras podem ser encontrados em diferentes formas e configurações, como os reusáveis, os fixados por abraçadeiras externas à mangueira e os *socketless* (sem abraçadeira e sem porca sextavada, apenas o *nipple*) (FILHO, 2015). Como tipo abordado neste estudo, os terminais metálicos prensados podem ser especificados de acordo com normas técnicas (*SAE, DIN, ABNT*, etc), divididos em uma série de tipos diferentes de terminais hidráulicos, com diferenciais em sua estrutura para melhor combinação e posterior acoplagem na mangueira. Alguns podem ser angulados, alongados, e em formatos incomuns para atender a demandas específicas (HENNING, 2021), conforme localidade e também, de acordo com as especificações de rosca e tipo de vedação. Em relação aos tipos de vedação mais encontrados no mercado, podem ser divididos em cinco, como JIC 37 alargadas (37 FF), vedação do ressalto (ORBS), vedação de face plana (ORFS), juntas com braçadeiras, parafusos ou vedações e “conexões rápidas” (AWAD; ALKELANI, 2012). No meio agrícola, são utilizados praticamente todos os tipos citados, porém em casos de sistemas altamente pressurizados, a utilização de vedação de face plana (ORFS), é mais confiável e menos propenso a vazamentos, especialmente com alta pressão de óleo, já que não há caminho de vedação metal-metal semelhante ao JIC 37 *Flare Fitting* (AWAD; ALKELANI, 2012). Neste tipo, especificado conforme norma SAE J1453, também conhecida como ORFS (*O-ring Face*

Seal), o anel de vedação se encontra na face do componente (Figura 3.5). Este sistema de vedação pode ser utilizado em pressões de até 6000 psi.

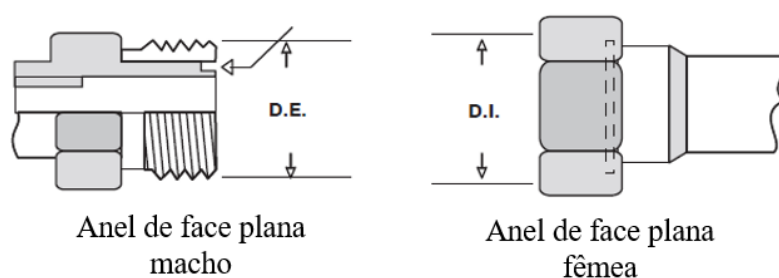


Figura 3.5: Desenho esquemático de vedação de face plana, sendo “D.E.” o diâmetro externo e “D.I.” o interno.

Fonte: Manual Prático Jason Comercial, 2022. Disponível em: www.jason.com.br. Acesso em Julho de 2023.

3.3.2 Conexões Hidráulicas

Conexões hidráulicas são responsáveis pela união de outros elementos hidráulicos, como mangueiras, tubos etc. Esses componentes são indispensáveis e, por isso, são utilizadas para ligar tubulações e promover a condução de fluidos de forma eficaz (LENZ, 2022). Além disso, é comum a utilização de conexões do tipo adaptador, que realiza a interface entre dois elementos de diferentes especificações, como por exemplo, sistema de unidades métrico para sistema imperial (Figura 3.6).

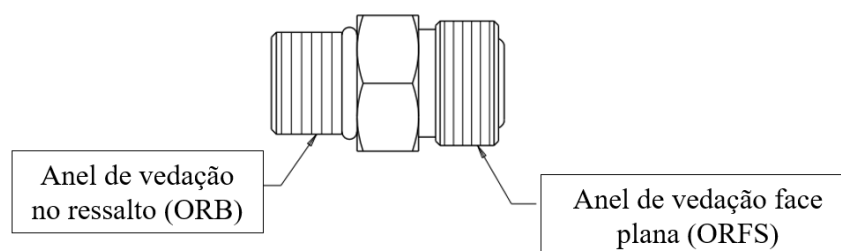


Figura 3.6: Desenho esquemático de um adaptador.

Fonte: Autor, 2023.

Assim como as mangueiras, os terminais também são escolhidos a partir das condições as quais serão submetidos durante a operação. Da mesma forma, os terminais prensados, as conexões podem ser fabricadas de diversos materiais, como aço ao carbono com revestimentos, aço inoxidáveis, latão e poliméricos. Na aplicação agrícola, devido às altas pressões de operação dos sistemas hidráulicos, é preferível a utilização de terminais e conexões

em aço ao carbono galvanizado e aço inoxidável. Além disso, as conexões hidráulicas também possuem diversos formatos (Figura 3.7) que facilitam a integração com as mangueiras hidráulicas ou outros elementos do sistema.



Figura 3.7: Tipos de conexões hidráulicas.

Fonte: Site Hennings, 2023. Disponível em: <https://hennings.com.br>. Acesso em Julho de 2023.

No caso das conexões e terminais hidráulicos galvanizados, é necessário cautela no momento da montagem destes componentes. Em caso de torque inapropriado ou manuseio incorreto da ferramenta de aperto, a galvanização pode ser danificada, podendo facilitar o início do processo corrosivo nestes componentes (FILHO, 2015).

3.4 Aços Baixo Carbono

Considerado por Lyon (2010) como onipresente e essencial à vida moderna, os aços são figuras extremamente relevantes para os avanços tecnológicos da sociedade nos últimos dois séculos. O aço pode ser definido como uma liga de ferro com pequenas quantidades de carbono (inferior a 2% em peso) e outros elementos (KRAUSS, 2005). O estudo de formação e das estruturas dos aços ao carbono deve iniciar com a análise do diagrama Fe-C (Figura. 3.8). As características básicas destes influenciam o comportamento de praticamente todas as ligas, até as mais complexas (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

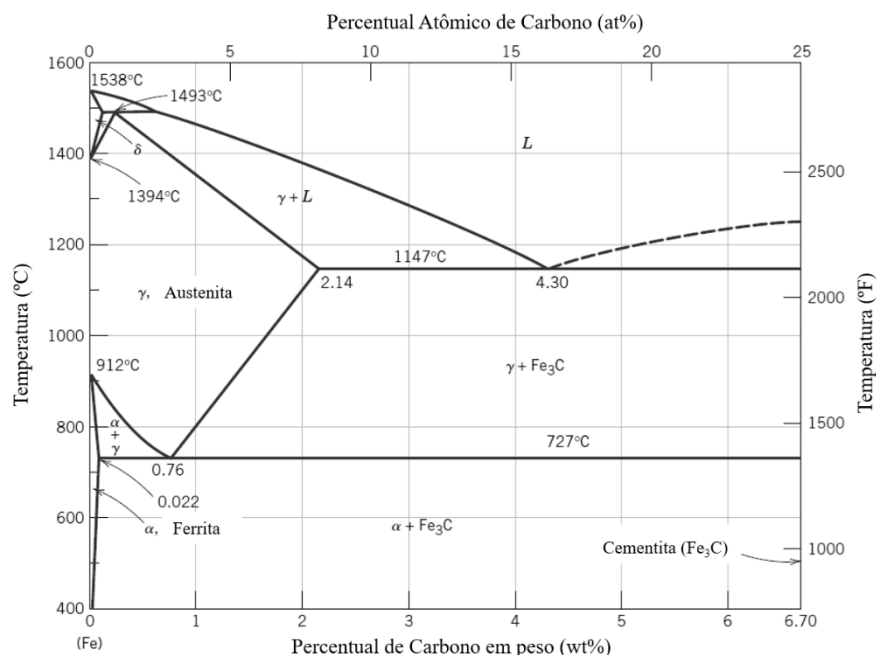


Figura 3.8: Diagrama Fe-C.
 Fonte: (CALLISTER, JR; RETHWISCH, 2013).

O carbono está geralmente presente no aço, à temperatura ambiente, como carboneto de ferro (Fe₃C ou cementita). Esta fase é estritamente metaestável à decomposição em grafite e ferro, no entanto, a reação é muito lenta em teores de carbono mais baixos (LYON, 2010).

Usualmente classifica-se os aços por seu conteúdo de carbono, mas os limites específicos não são bem definidos. Geralmente, os aços de baixo carbono contém até 0,15% de carbono e 0,3–0,6% manganês em massa. Possuem uma resistência mecânica relativamente baixa, porém alta conformabilidade, usado normalmente na produção de chapas. Já o aço doce contém de 0,15% a 0,3% de carbono e é usado em produtos laminados planos onde resistências maiores são necessárias (LYON, 2010).

3.4.1 Revestimentos/Galvanização

Na ciência dos materiais, é comum a utilização de revestimentos para obtenção de melhores propriedades superficiais de um componente. Diferentemente de tratamentos térmicos e termoquímicos, os revestimentos são camadas depositadas diretamente sobre a superfície do componente/peça (REGULY *et al*, 2014). Nos aços ao carbono, é extremamente comum a utilização de revestimentos para ganho de propriedades anticorrosivas. O zinco, elemento com notável resistência à corrosão, pode ser utilizado como revestimento em aços, sendo mais da metade do seu consumo mundial nesta aplicação (LYON, 2010).

A galvanoplastia é conhecida como a principal maneira de usar o zinco como proteção galvânica, pela formação de uma fina camada de zinco, depositada para formar a barreira resistente à corrosão na superfície das estruturas de metal/aço (ANWAR *et al.*, 2019). Atualmente, processos mais utilizados para aplicação de revestimentos à base de zinco são: imersão a quente e eletrodeposição (TOMACHUK, 2015). Existem ainda outros processos, porém menos utilizados, como a aspensão térmica (metalização), sherardização e revestimento por tinta rica em zinco (TOMACHUK, 2015).

No processo de galvanoplastia a quente, o recobrimento é realizado por meio químico e/ou eletroquímico, a partir de solução aquosa de zinco (MOREIRA, 2010). Neste processo, a peça é então mergulhada em um banho de zinco fundido a temperaturas entre 420 °C e 460 °C. Em seguida, o componente é então submerso em água para que a reação de formação da camada intermediária de ZnFe seja interrompida (TOMACHUK, 2015).

Já na galvanoplastia à frio, ou também conhecida como eletrodeposição, o processo, consiste na eletrodeposição dos íons do metal mais nobre no substrato através da imposição de uma corrente elétrica (CEDRIM *et al.*, 2016). É um processo difundido na indústria, pois gera um revestimento refinado e relativamente livre defeitos e excesso de material depositado. A espessura do revestimento é influenciada por alguns fatores como densidade de corrente, concentração dos sais, temperatura do banho, presença de aditivos e pela natureza do metal-base (CEDRIM *et al.*, 2016).

Como o potencial de redução do zinco ($E_0 = -0,76$ V) é mais negativo que o do ferro ($E_0 = -0,44$ V), ele então se dissolve rapidamente em um ambiente altamente corrosivo (ANWAR *et al.*, 2019). Apesar da boa proteção contra corrosão, a vida útil é significativamente reduzida devido ao crescimento de camadas de produtos de corrosão na superfície revestida, comumente chamada de ferrugem branca (ANWAR *et al.*, 2019). Outro ponto importante a ser destacado, são os problemas graves relacionados à poluição ambiental pela contaminação da água por metais pesados, provenientes do banho utilizado no processo. Ao exceder a concentração limite, os metais pesados podem causar danos à saúde dos seres vivos, como por exemplo câncer (MOREIRA, 2010). Partindo dessa premissa, novas maneiras de utilizar o zinco combinado com outros elementos foram desenvolvidas para aumentar o tempo em operação sob condições agressivas.

Um exemplo de grande aplicação atualmente, é a utilização de zinco combinado com níquel, havendo um ganho de propriedades mecânicas e anticorrosivas. Revestimentos de liga

de zinco, como Zn-Ni, Zn-Co e Zn-Fe, podem resultar em melhor resistência à corrosão em comparação com um revestimento de zinco puro. Devido às excelentes propriedades de resistência à corrosão do níquel, os revestimentos de liga de Zn-Ni vem sendo usados extensivamente para proteger os substratos de aço (ANWAR *et al.*, 2019). Além disso, a eletrodeposição de Zn-Ni é um processo ecologicamente mais limpo, comparado aos de revestimentos utilizando zinco puro e cádmio (ANWAR *et al.*, 2019)

3.5 Aços Inoxidáveis

Na indústria moderna atual, os aços inoxidáveis são amplamente utilizados em diversos setores, com ênfase na área de engenharia química e de energia, alimentos e bebidas, farmacêutica e transporte. Outros usos importantes são em arquitetura, utensílios domésticos, pequenos eletrodomésticos e eletroeletrônicos (IRON AND STEEL SOCIETY, 1999). Essa vasta gama de aplicações se dá através das milhares de combinações de adições de Cromo, combinados ou não com outros elementos de liga, como Níquel, Manganês, Molibdênio entre outros (IRON AND STEEL SOCIETY, 1999), possibilitando inúmeras combinações de propriedades.

De acordo com Bhadeshia e Honeycombe (2006), é a presença de Cromo a principal responsável pela melhoria na resistência à corrosão do aço, devido a formação de um filme de óxidos estável muito fino na superfície. Destaca-se que os aços inoxidáveis cromo-níquel são agora os materiais mais amplamente utilizados em uma vasta gama de ambientes corrosivos, tanto em temperatura ambiente quanto em temperaturas elevadas ou extremamente baixas, por não sofrerem uma transição dúctil/frágil problemática. Aços inoxidáveis por definição, devem possuir um teor mínimo de 10,5% de Cromo na liga (IRON AND STEEL SOCIETY, 1999). A Figura 3.9 mostra o diagrama de fase de equilíbrio Fe-Cr. Assim como no sistema Fe-C, as formas alotrópicas de ferro se encontram na extremidade esquerda do diagrama. O cromo é um elemento estabilizador da estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) do ferro, portanto, com o aumento do teor de cromo, superior a 12%, os campos de ferrita alfa (Fe- α) e delta (Fe- δ) tendem a expandir (KRAUSS, 2005).

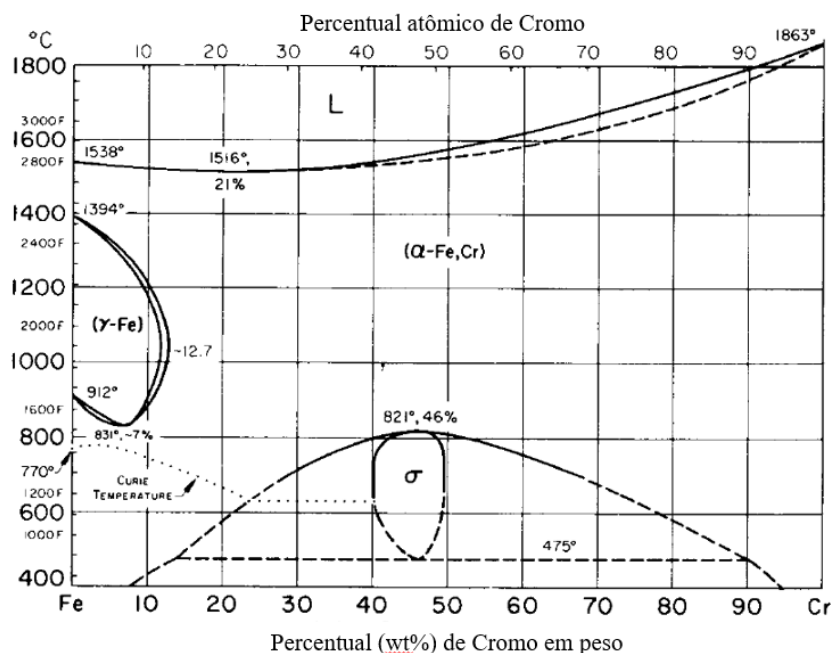


Figura 3.9: Diagrama Fe-Cr.
Fonte: Krauss, 2005.

Com a expansão do campo ferrítico e a consequente contração do austenítico, é formada então a região conhecida como *lupa austenítica* conforme Figura 3.10 (KRAUSS, 2005). Essa região do diagrama também pode ser formada pela adição de elementos como molibdênio e vanádio, sendo essenciais para que haja a transformação de austenita para martensita no resfriamento, nos aços inoxidáveis martensíticos (KRAUSS, 2005). Já para os ferríticos, o percentual em peso de cromo é significativamente superior, pois a ferrita é estável em todas as temperaturas do diagrama (Figura 3.9) (KRAUSS, 2005).

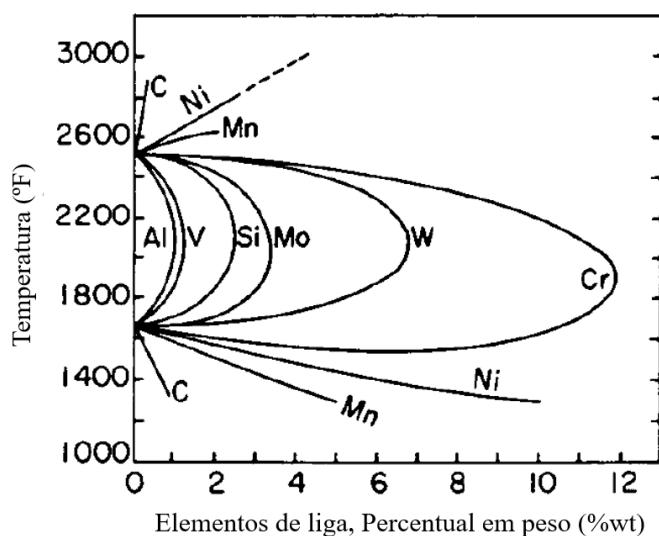


Figura 3.10: Lupa Austenítica.
Fonte: Krauss, 2005.

Para a formação de aços inoxidáveis austeníticos, além do cromo, o níquel é o principal elemento constituinte, pois este é responsável pela estabilização da estrutura cúbica de face centrada do ferro (CFC), expandindo o campo austenítico ou fase Gama (γ) (KRAUSS, 2005).

No diagrama de equilíbrio Fe-Ni (Figura 3.11), é possível observar a composição necessária de níquel para obtenção de austenita em qualquer ponto acima da temperatura ambiente. Porém, devido ao percentual de cromo presente para ganho de propriedades anticorrosivas, este também reduz o percentual de níquel necessário para a obtenção de austenita à qualquer temperatura (KRAUSS, 2005).

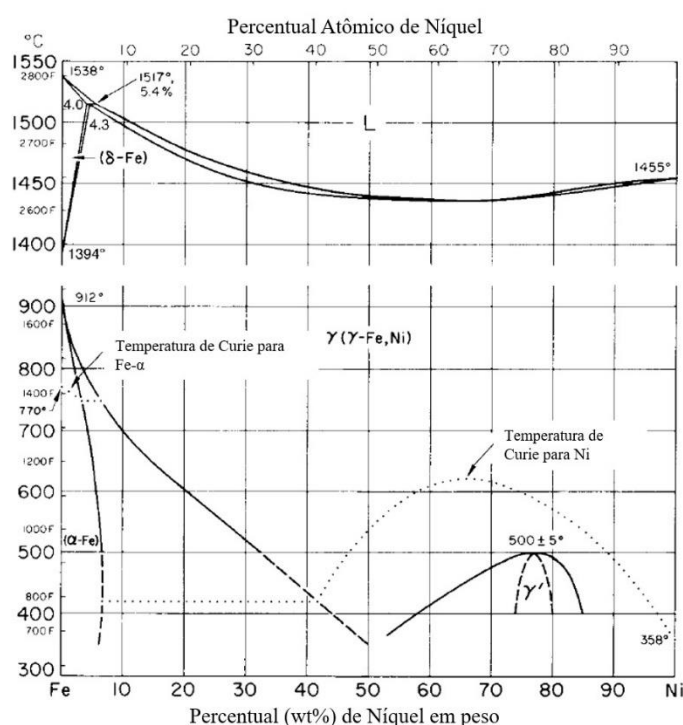


Figura 3.11: Diagrama de equilíbrio Fe-Ni.

Fonte: Krauss, 2005.

3.6 Corrosão

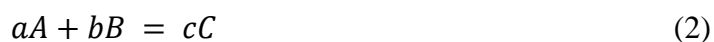
Os processos corrosivos são um dos maiores e mais presentes problemas encontrados na indústria, independentemente da área. Por definição, a corrosão é dita como a deterioração de um determinado material, devido à processos químicos ou eletroquímicos influenciados pelo meio em que se encontra, podendo ou não estar sob esforços mecânicos (GENTIL, 2011), tendendo sempre ao seu estado de menor energia. Os meios em que esses processos frequentemente são a atmosfera, águas naturais, solo e produtos químicos (GENTIL, 2011). O

impacto econômico da corrosão e o seu grau de severidade, estão diretamente relacionado à criticidade e risco associado ao material sob este fenômeno (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994).

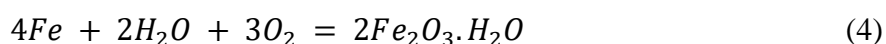
A fim de obter-se um entendimento básico de como a corrosão ocorre, Shreir (1994) entende que é necessário desconsiderar momentaneamente os detalhes microestruturais do material em análise, considerando apenas o fenômeno corrosivo como uma reação química que ocorre em uma interface entre metal e não-metal, sendo o próprio metal um dos reagentes. Logo, define-se a corrosão pela reação química (1):



onde A é o metal e B o reagente não metálico (ou reagentes), e C e D os produtos da reação. O produto C é caracterizado como uma forma oxidada do reagente (metal), enquanto D, é considerado como produto de corrosão. Simplificando ainda mais a reação, obtêm-se a eq. (2), e (3) utilizando o ferro como exemplo:



As reações (2) e (3) indicam o produto da reação como uma forma oxidada do metal ou como a forma reduzida do não-metal. Reações deste tipo, que não envolvem água ou soluções aquosas, são referidos como corrosão "seca". Em situações em que há presença de solução aquosa, Shreir (1994), expressa a mesma reação anterior, apenas adicionando água à reação global, conforme eq. (4):



Para Shreir (1994), de maneira geral, a corrosão pode ser considerada, portanto, como uma reação redox heterogênea em um metal-metal interface na qual o metal é oxidado e o não-metal é reduzido. As reações de oxirredução ocorrem, geralmente, devido à transferência de elétrons (GENTIL, 2011), sendo dividido em dois mecanismos: eletroquímico e químico. Quando a transferência de cargas ocorre através de uma interface ou eletrólito, trata-se do mecanismo eletroquímico (GENTIL, 2011). Já no mecanismo químico, as reações químicas entre o material metálico e o meio corrosivo são diretas, não havendo geração de corrente

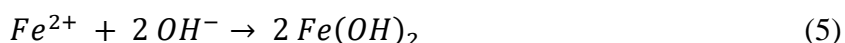
elétrica (GENTIL, 2011), diferentemente do caso anterior. Neste trabalho, será abordado apenas o mecanismo de corrosão eletroquímica, devido à aplicação dos componentes estudados.

A corrosão eletroquímica é caracterizada pela perda de elétrons de uma determinada região para outra, configurando uma *pilha de corrosão* (GENTIL, 2011). O processo corrosivo pode ser então em três etapas principais, sendo o anódico definido pela passagem dos íons para a solução, a própria transferência de elétrons e íons, e o processo catódico, que consiste na recepção dos mesmos pelas moléculas e íons presentes na solução (GENTIL, 2011). O autor ainda destaca que os processos anódicos e catódicos são energeticamente equivalentes, isto é, a passagem de um cátion para o ânodo não produz acúmulo de eletricidade. Nestes casos, a lei de Faraday determina a intensidade do processo de corrosão, que pode ser medida através do número de cargas dos íons que migram para solução ou dos que se descarregam no cátodo, além do número de elétrons que se deslocam do ânodo para o cátodo (GENTIL, 2011).

As características morfológicas dos produtos gerados pela corrosão são de grande importância para a compreensão do mecanismo envolvido e proteção do componente. De maneira geral, a corrosão pode progredir no material de maneira uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercrystalina), intragranular (ou transgranular ou transcrystalina), filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio (GENTIL, 2011).

3.6.1 Corrosão em Aços ao Carbono

O ferro e o aço sob atmosfera são extremamente suscetíveis aos processos corrosivos na maioria dos ambientes, porém a dimensão da corrosão depende diretamente da composição e condição da superfície do metal, a agressividade do meio e as condições de temperatura locais (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994). Os aços ao carbono, quando expostos ao ar puro e seco em temperaturas próximas à ambiente, formam uma camada fina de óxidos, que acaba protegendo a superfície do metal (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994), porém ao entrar em contato com eletrólitos, geralmente se decompõe, formando o óxido de ferro, (Eq. 5).



Que então é oxidado formando $Fe(OH)_3$, uma espécie mais simples de oxidação. Ao combinar-se com a água (umidade por exemplo), tem-se então o hidróxido de ferro

($2Fe_2O_3.H_2O$), com coloração marrom e tons avermelhados característicos (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994).

A grande maioria dos aços ao carbono sofre adição de elementos de liga para ganho de propriedades, em geral, mecânicas. Porém com variação do teor de alguns elementos, pode-se obter ganho de propriedades anticorrosivas. O aumento dos teores de carbono, manganês e silício, por exemplo, promove uma melhor proteção contra corrosão em atmosferas ao ar livre (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994). Apesar disso, o vapor d'água está sempre presente na atmosfera, podendo promover, sob certas condições, a corrosão nos aços em umidades relativas bem abaixo da saturação.

Outros fatores importantes na oxidação dos aços ao carbono expostos às condições atmosféricas, são a presença de impurezas e compostos que aumentam a corrosão, tais substâncias como cloretos e sal de amônio, com maior destaque para o dióxido de enxofre (SO_2), encontrado comumente em atmosferas industriais (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994).

O efeito do enxofre na corrosão atmosférica tem grande importância para o meio agrícola, uma vez que os fertilizantes NPK, em algumas formulações, podem conter teores de enxofre que podem impactar negativamente a vida útil de componentes de máquinas agrícolas, fabricados em aço ao carbono. A Figura 3.12 ilustra os resultados obtidos em uma série de testes realizados na região industrial de Sheffield, Inglaterra. É possível observar que o dióxido de enxofre foi responsável por cerca de 50% das variações na taxa de corrosão nos diferentes locais analisados no estudo (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994).

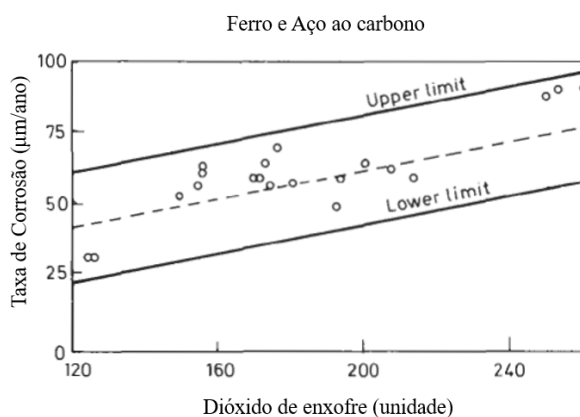


Figura 3.12: Variação da taxa de corrosão em função da presença de SO_2 (1 unidade de SO_2 é equivalente à leitura média diária em g de SO_2 por m^3 de ar).

Fonte: SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994.

3.6.2 Corrosão em Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis são reconhecidos pelas excelentes propriedades mecânicas e pela boa resistência à corrosão em diversos ambientes agressivos. O ponto chave para isso, é a grande capacidade que é devida quase inteiramente, de exibir passividade em uma ampla gama de ambientes (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994). A passivação ocorre na superfície do aço, por um filme muito fino de óxido, que impede o contato entre o metal e o meio corrosivo (GENTIL, 2011). Para que a proteção do substrato se mantenha em caso de quebra deste filme, uma pequena quantidade de oxigênio dissolvido na solução é necessária, reparando possíveis fraturas no filme com novos óxidos (GENTIL, 2011). A presença do cromo é a principal responsável pela formação do filme, proporcionando ganho de propriedades anticorrosivas, tanto em temperatura ambiente quanto em temperaturas mais elevadas (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

A resistência à corrosão da maioria dos aços inoxidáveis apresenta melhor desempenho quando estes são monofásicos e se encontram em estado homogêneo (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994). Os processos corrosivos manifestam-se de diferentes maneiras, variando de acordo com o pH do meio, possuindo um caráter uniforme em soluções ácidas, sendo raro a ocorrência de corrosão localizada (pites). Já para o caso de soluções mais próximas da neutralidade e alcalinas, a corrosão se dá majoritariamente por pits (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994).

A utilização de aços inoxidáveis sob condições atmosféricas ainda é um vasto campo a ser estudado. O bom desempenho dessas ligas em ambientes internos, mesmo em séries de menor qualidade, é possível devido à baixa umidade relativa do ar (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994). Testes de exposição demonstraram uma maior suscetibilidade em ambientes marítimos e áreas industriais, onde a atmosfera promove a corrosão devido à presença de compostos como cloretos e gases sulfurados. A maneira como ela se apresenta no material é em forma de pits muito finos, de tamanho pequeno porém em alta densidade, ocasionando como efeito visual a perda de refletividade da superfície (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994).

Os aços austeníticos contemplados pela norma AISI 316, possuem, junto ao cromo e níquel, adições de molibdênio (2-4%wt), que resultam em um ganho geral na resistência à corrosão, especialmente na corrosão por pits (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006). A corrosão em aços inoxidáveis também pode ocorrer nos grãos (intergranular), quando o material

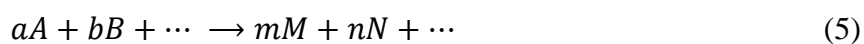
é submetido ao reaquecimento em temperaturas abaixo da temperatura de tratamento térmico, levando à formação de precipitados ricos em cromo $M_{23}C_{16}$ que se alocam nos contornos de grão (SHREIR; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, 1994). Para evitar a formação de carbeto e as suas consequências, alguns tipos de aço austeníticos, por exemplo. 304 e 316, possuem teores de carbono inferiores a 0,03% em peso, classificados como 304L e 316L (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

3.7 Técnicas Eletroquímicas

Entende-se por técnicas eletroquímicas, aquelas que podem ser aplicadas na avaliação, no controle e na investigação de processos corrosivos nos metais (WOLYNEC, 2003). Os processos corrosivos nos metais podem ocorrer em diversos tipos de meios, porém o meio de maior ocorrência é o aquoso, onde o mecanismo da corrosão é principalmente eletroquímico (WOLYNEC, 2003). Woly nec (2003) ainda destaca que, neste meio, o principal solvente é a água, e, também, podendo ser encontrada em sua forma condensada, em casos de corrosão atmosférica.

As reações eletroquímicas, por definição, envolve a passagem de corrente elétrica em uma distância finita, porém maior do que a distância entre os átomos (WOLYNEC, 2003). A corrente elétrica engloba a movimentação de partículas carregadas, podendo ser íons, elétrons ou ambos simultaneamente. Logo, a grande maioria da reações que ocorrem em superfícies de metais possuem natureza eletroquímica (WOLYNEC, 2003).

O comportamento de sistemas eletroquímicos podem ser determinado através de reações que definem o papel das espécies envolvidas (ZOSKI, 2007). Sabe-se que a ocorrência ou não de reações químicas, de acordo com a termodinâmica, está diretamente relacionada à Energia livre química (ΔG) (WOLYNEC, 2003), conforme eqs. (5) e (6):



$$\Delta G = (mG_M + nG_N + \dots) - (aG_A + bG_B + \dots) \quad (6)$$

Onde $G_A, G_B, \dots, G_M, G_N$ são chamados de energia livre dos reagentes A, B e de seus produtos M e N. A espontaneidade dessas reações é dada pelo valor de energia livre, ou seja, quando $\Delta G < 0$, a reação é espontânea; para $\Delta G > 0$, não espontânea; e quando $\Delta G = 0$ a reação está em equilíbrio dinâmico, isto é, a cinética da reação é a mesma para ambos os sentidos (WOLYNEC, 2003).

3.7.1 Curvas de Polarização

As curvas de polarização são consideradas uma das principais técnicas experimentais eletroquímicas utilizadas para a determinação do potencial de corrosão (WOLYNEC, 2003), o qual possui extrema importância na tanto na avaliação quanto investigação de processos corrosivos. Os metais, quando submetidos à corrosão em eletrólitos de baixa resistência elétrica, gera um potencial único, também conhecido como *potencial de corrosão ou medida de potencial em circuito aberto*. A medição deste, é considerada fácil de ser determinada experimentalmente, através da intersecção da curva de polarização anódica com a catódica (WOLYNEC, 2003).

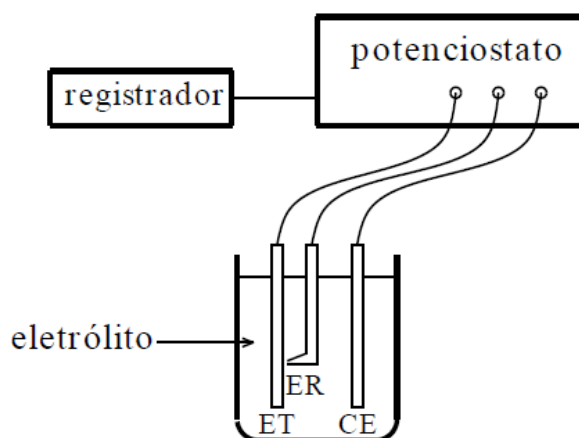


Figura 3.13: Arranjo esquemático para levantamento de curvas de polarização.
Fonte: WOLYNEC, 2003.

Conforme Figura 3.13, o potencial de corrosão é medido pelo eletrodo de trabalho (ET), conectado ao multímetro, assim como o eletrodo de referência (ER). O registrador, é responsável pela aferição dos dados medidos ao longo de um determinado tempo, o que é essencial para a geração da curva de polarização do material em questão (WOLYNEC, 2003). Uma configuração muito recorrente da célula de polarização, é a célula de três eletrodos, que consiste em um eletrodo de trabalho (material a ser analisado), um eletrodo de referência e um contraeletrodo (GENTIL, 2011).

Para obtenção de uma curva de polarização, deve-se impor um potencial diferente do potencial de corrosão, ou seja, através de uma fonte externa. Para um controle adequado desse potencial aplicado, normalmente um potenciostato é então utilizado, onde além de impor ao eletrodo o potencial desejado com relação ao eletrodo de referência, é possível aferir a corrente de polarização. Assim, obtém-se as curvas representativas da relação entre o potencial de

eletrodo aplicado e a corrente medida no potenciostato, caracterizando as curvas de polarização (WOLYNEC, 2003). As curvas geradas através do potenciostato representam não só a polarização causada por uma única reação, mas, sim, do efeito global de todas as reações que ocorrem simultaneamente sobre o eletrodo (WOLYNEC, 2003).

As curvas de polarização podem ser obtidas através de dois métodos: potenciostático e potenciocinético ou potenciodinâmico (WOLYNEC, 2003). Resumidamente, no método potenciostático, aplicam-se valores discretos, crescentes ou decrescentes, ao potencial de eletrodo E , gerando assim, para cada potencial, um valor correspondente de corrente elétrica (i) (WOLYNEC, 2003). Neste trabalho, será abordado apenas a técnica de polarização potenciodinâmica, utilizada na parte experimental.

O método potenciodinâmico consiste na variação contínua do potencial de eletrodo E , registro da corrente elétrica medida pelo potenciostato, ao longo de um determinado tempo (WOLYNEC, 2003). A taxa de varredura de potencial com o tempo é chamada de velocidade de varrimento ou varredura, que é medida em mV/s ou mV/min, e pode ser configurada de acordo com a necessidade através de uma unidade acoplada ou não ao potenciostato (WOLYNEC, 2003).

O cálculo da taxa de corrosão pode ser realizado através de vários métodos, sendo escolhido para este estudo o mecanismo das retas de Tafel. Este método baseia-se na extrapolação das retas de Tafel (GENTIL, 2011). A Figura 3.14 ilustra como são traçadas as retas, e a partir delas, obtém-se os valores da corrente elétrica de corrosão (I_{corr}).

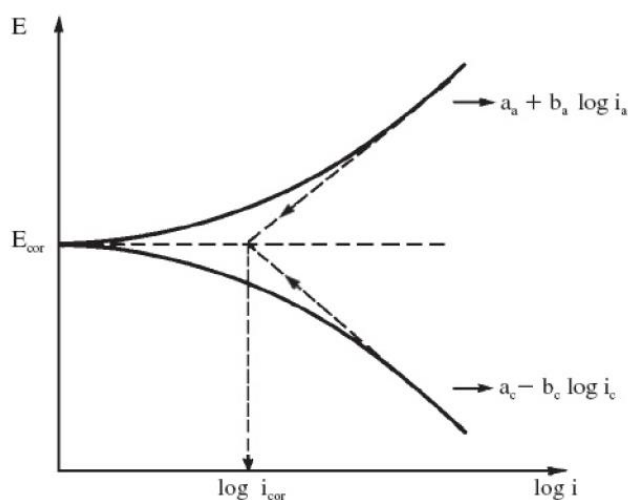


Figura 3.14: Extrapolação das retas de Tafel.
Fonte: Gentil, 2011.

4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Amostras Utilizadas

4.1.1 Recebimento e separação

As amostras escolhidas e utilizadas no presente estudo, são comumente utilizadas em sistemas hidráulicos móveis em semeadoras-adubadoras de grãos. As amostras empregadas nesse trabalho foram retiradas de campo ou ainda amostras novas de diferentes materiais. A relação de fornecedores e o estado como recebidas estão indicadas na Tabela 4.1, e o diagrama dos métodos utilizados na Figura 4.1.

As amostras novas foram empregadas para realização do ensaio em corrosão para determinar a taxa de corrosão a partir de ensaios eletroquímicos (Figura 4.1). Nesse estudo de corrosão foi a simulada o meio com o qual os elementos hidráulicos utilizados ficam em contato (solução aquosa contendo 1% de NPK).

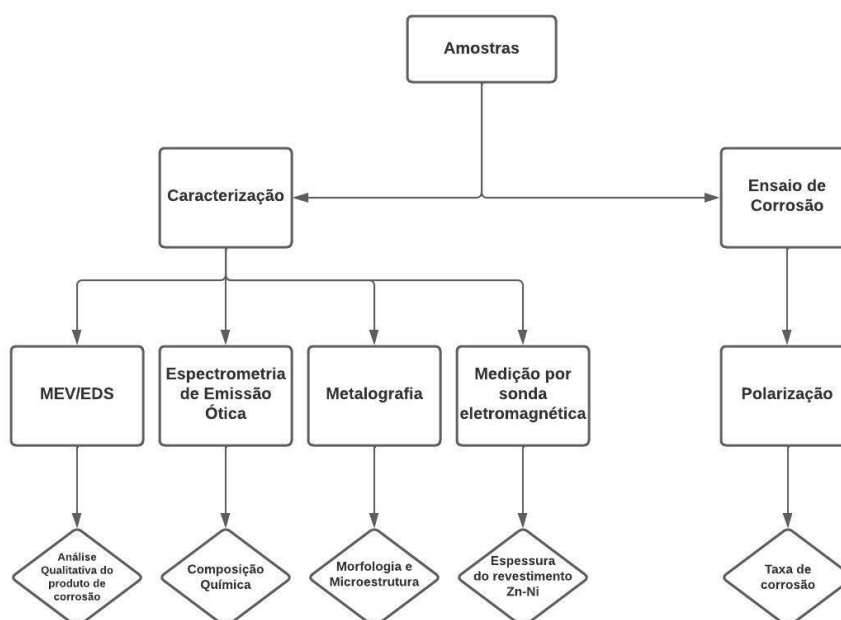


Figura 4.1: Diagrama dos métodos aplicados e os resultados esperados.

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 4.1: Relação de amostras recebidas.

Amostra	Quantidade	Fornecedor	Estado
Terminal em aço ao carbono galvanizado	3	AGCO do Brasil Soluções Agrícolas	Retirado de campo
Conexão hidráulica em aço ao carbono galvanizado	6	AGCO do Brasil Soluções Agrícolas	Retirado de campo
Terminal de Mangueira em aço ao carbono revestido	1	Hansa Flex do Brasil LTDA	Novo
Terminal de Mangueira em aço inoxidável	1	Hansa Flex do Brasil LTDA	Novo
Conexão Hidráulica em aço revestido	1	Hansa Flex do Brasil LTDA	Novo

Fonte: Autor, 2023.

No caso das amostras provenientes da operação em campo, não foi possível rastrear a quantidade exata de horas em funcionamento, apenas o tempo total desde sua montagem, que foi de 5 anos. Conforme o fornecedor, neste período, a máquina operou em dois plantios por ano, e, testes funcionais dos sistemas hidráulicos em pequenas áreas durante períodos de uma semana, em média.

A partir de uma inspeção visual, as amostras provenientes de campo foram numeradas e nomeadas, sendo definido o lado “A” como o de maior corrosão aparente em relação ao lado “B”. A Figura 4.2 ilustra como foi realizada a divisão: as amostras retiradas de conexões hidráulicas possuem nomenclatura “CX-X”, e os terminais (TX-X). Em seguida, a Figura 4.3 exibe a fotografia na data do recebimento.



Figura 4.2: Desenho esquemático da separação das amostras.

Fonte: Autor, 2023.



Figura 4.3: Amostras recebidas de campo.

Fonte: Autor.

Para o caso dos itens novos, a divisão das amostras foi feita de acordo com a Figura 4.4 A e B.

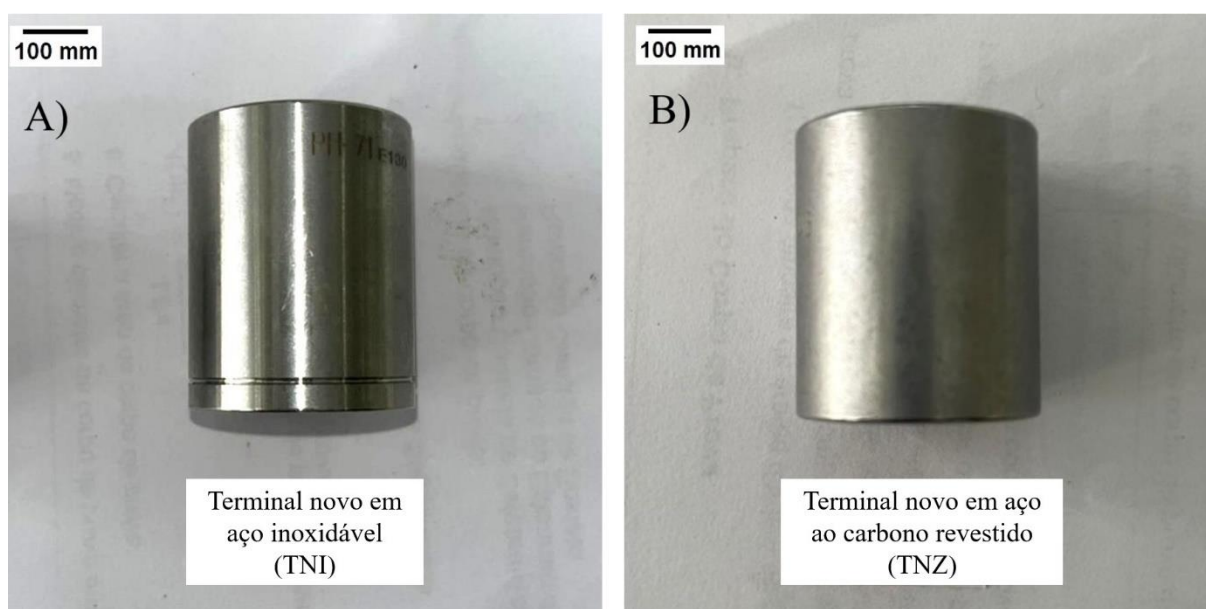


Figura 4.4: Amostras novas recebidas. A) TNI; B) TNZ.

Fonte: Autor, 2023.

4.1.1 Espectrometria de Emissão Ótica

A fim de determinação e classificação precisas do material recebido, foram realizadas as análises de composição química de todas as amostras. Das unidades retiradas de campo, após a inspeção visual, foi selecionada para as análises a amostra 02 (Figura 4.3), lado A e lado B, que à olho nu apresentou uma maior quantidade de produtos de corrosão. Conforme Figura 4.5 e Figura 4.6, a unidade escolhida contempla terminais em aço revestido e conexões em aço revestido.

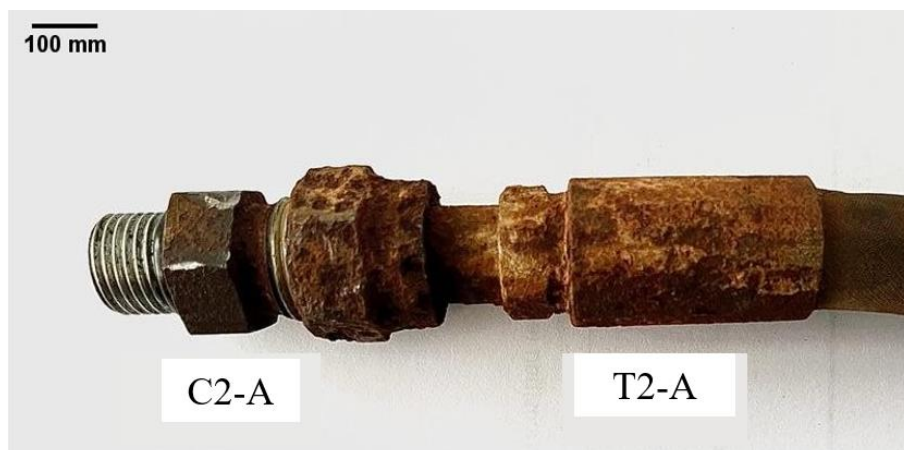


Figura 4.5: Amostra 02 subdividida em C2-A e T2-A, conforme nomenclatura utilizada.
Fonte: Autor, 2023.



Figura 4.6: Amostra 02 subdividida em C2-B e T2-B, conforme nomenclatura utilizada.
Fonte: Autor, 2023.

O processo de preparo tanto para as amostras de campo quanto as novas, consistiu em corte utilizando a máquina de corte metalográfico de modelo TECLAGO® CM80, e lixamento até a lixa de granulometria #1200. Quanto ao procedimento, foram realizadas triplicatas de cada amostra, utilizando o espectrômetro de emissão óptica de marca SPECTRO®, modelo Spectrolab, no Grupo de Análise de Falha (GAF), pertencente ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.1.2 Metalografia

A fim de identificação das microestruturas dos materiais utilizados, utilizou-se da técnica de análise metalográfica. O preparo das amostras consistiu em corte utilizando a cortadora metalográfica citada anteriormente, embutimento, seguido de lixamento até a lixa

#1200 e polimento da superfície com alumina 3 μm , previamente ao ataque químico. Os reagentes utilizados para evidenciar as microestruturas estão expostos na Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Reagentes utilizados no ataque químico.

Amostra	Reagente
Aço ao Carbono (Sem revestimento)	Nital 2%
Aço ao Carbono (Com revestimento)	Nital 2%
Aço Inoxidável	Ácido Oxálico em meio eletrolítico

Fonte: Autor, 2023.

Para o caso do aço inoxidável, o ataque químico foi feito com ácido oxálico 9% em meio eletrolítico, com passagem de corrente e tensão. Após o ataque, as amostras foram enxaguadas em água corrente, efetuada limpeza com álcool etílico e posterior secagem através de jato de ar quente e levadas ao microscópio para análise. Na aquisição das imagens, foi utilizado o microscópio óptico de marca ZEISS®, modelo *Axio Imager.Z2m*, através do software do software ZEISS® *Zen Blue 3.3*, localizado no GAF.

4.1.3 Análise do produto de corrosão

Como não houve uma boa precisão referente aos períodos sob condições corrosivas das amostras recebidas de campo, entendeu-se como essencial uma análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de detecção de energia dispersiva (EDS). A preparação das amostras para esta análise consistiu apenas em corte metalográfico, uma vez que objetivou-se obter informações sobre o produto de corrosão presente. No procedimento, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura SSX-550, de marca SHIMADZU®, localizado no GAF.

4.1.4 Ensaio Eletroquímico de Polarização Potenciodinâmica

Os ensaios eletroquímicos tiveram 4 repetições nas amostras em aço ao carbono sem revestimento, aço ao carbono com revestimento Zn-Ni, e em aço inoxidável. Os ensaios consistiram em curvas de polarização potenciodinâmicas em uma célula eletroquímica de 3 eletrodos, utilizando um potenciostato de modelo Metrohm Autolab. Como eletrodo de

referência, foi utilizado um eletrodo de calomelano saturado (ECS), e um contra eletrodo de platina. As amostras dos materiais estudados foram instrumentadas conforme Figura 4.7, onde foi isolada uma área de $0,066 \text{ mm}^2$, utilizando uma fita galvânica de marca *SCOTCH*[®]. O eletrólito consistiu em uma solução de água deionizada + 1% do fertilizante misto 02-23-23 *NPK* do fabricante *Yara Fertilizantes*, com pH em 5,5. Apesar do fertilizante descrito ser aplicado de maneira sólida no campo, optou-se pela dissolução pela viabilidade dos ensaios de polarização e, pela combinação do particulado proveniente quando depositado no solo com a umidade atmosférica. Utilizando o equipamento METROHM[®], modelo PGSTAT302 NA, foi realizado o monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP) até a estabilização (variação de $\pm 5 \text{ mV}$ em um período de 5 minutos), e a varredura de potencial iniciou 500 mV abaixo do potencial de circuito aberto, até 600 mV acima do mesmo. A taxa de varredura utilizada foi de 1 mV/s .



Figura 4.7: Instrumentação utilizando fita galvânica, com um $d=6,5 \text{ mm}$ na área exposta.
Fonte: Autor, 2023.

A taxa de corrosão para cada material ensaiado foi determinada a partir do mecanismo das retas de Tafel, onde as retas tangentes foram posicionadas 30 mV acima e 30 mV abaixo das seções lineares das curvas de polarização. A partir disso, determinou-se o potencial de corrosão, o E_{CORR} , a densidade de corrente de corrosão, o I_{CORR} , e a taxa de corrosão, através do software NOVA 2.1.

4.1.5 Medição de espessura do revestimento

As amostras novas em aço com revestimento Zn-Ni foram submetidas a uma medição da camada protetora do substrato. O equipamento de indução eletromagnética utilizado para a realização da aferição foi o modelo FMP40 *Dualscope*, equipado com a sonda dual FD13H, da marca FISCHER HELMUT[®], no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC).

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Metalúrgica

5.1.1 Espectrometria de Emissão Ótica

A composição química obtidas na análise estão representados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Composição química das amostras, obtida por espectrometria (% em peso).

	C2-A	C2-B	T2-A	T2-B	TNZ	TNI
Fe	97,88	97,91	98,29	97,04	99,32	68,72
Mn	1,169	1,178	1,24	2,13	0,3955	1,974
C	0,074	0,0759	0,083	0,0741	0,0998	0,0281
Si	0,0374	0,0336	0,005	0,0684	0,0358	0,4813
P	0,0356	0,0346	0,0339	0,025	0,0104	0,0191
S	0,2938	0,2729	0,2369	0,3	0,0115	0,0241
Cr	0,135	0,1505	0,0347	0,1312	0,032	17,19
Mo	0,0162	0,015	0,005	0,0253	0,005	2,071
Ni	0,0684	0,0637	0,005	0,0138	0,0063	10,68
Al	0,001	0,01	0,001	0,001	0,0287	0,0143
Co	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0124	0,0655
Cu	0,2012	0,1983	0,01	0,0164	0,0462	0,4147
Nb	0,004	0,0026	0,0044	0,0068	0,001	0,0248
Ti	0,001	0,001	0,001	0,0018	0,001	0,1505
V	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0754
W	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0299
Pb	0,0657	0,064	0,0725	0,0393	0,002	0,002
Sn	0,0041	0,0041	0,001	0,001	0,0015	0,0017
Mg	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	-
B	0,0075	0,0015	0,0001	0,0505	0,0001	0,03

Fonte: Autor, 2023.

De acordo com os resultados da Tabela 5.1, observando os teores de cada material de acordo com as normas *SAE/AISI*, classificam-se, de acordo com a Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Identificação dos aços estudados conforme norma SAE/AISI.

Amostra	Classificação SAE/AISI
C2-A	1215
C2-B	1215
T2-A	1215
T2-B	1215
TNZ	1010
TNI	316L

Fonte: Autor, 2023.

Os aços da classe SAE/AISI 1215, encontrados nas amostras coletadas em campo, são chamados de aços dessulfurados ou de usinagem fácil, onde a presença de inclusões globulares de MnS em quantidades maiores, exige maiores porcentagens de enxofre e manganês nesses aços. A presença desses elementos interrompe a continuidade da matriz ferrítica, que possui muita plasticidade. Assim, obtém-se condições de usinagem mais rápida, com menor potência e melhor acabamento superficial (CHIAVERINI, 2008).

As amostras novas em *SAE/AISI 1010* revestidos com Zn-Ni, possuem substrato em aço ao carbono comum, conforme comentado por Chiaverini (2008), além de possui um teor de carbono baixo, elementos como enxofre, manganês, silício e alumínio também estão abaixo do valor máximo estabelecido por norma, pois são os principais responsáveis pela formação de inclusões não-metálicas (CHIAVERINI, 2008).

Os resultados da análise de composição química confirmaram que as amostras novas fabricadas em aço inoxidável austenítico de acordo com as normas *SAE/AISI 316L*, sendo “L” referente ao baixo teor de carbono (<0,03% em peso), é utilizado comumente em aplicações suscetíveis à corrosão química (CHIAVERINI, 2008). Além de cromo e níquel, a adição de molibdênio proporciona um melhor desempenho contra a corrosão, em particular, à corrosão por pites (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006). Estes aços apresentam resistência à corrosão superior à maioria dos outros aços inoxidáveis (IRON AND STEEL SOCIETY, 1999).

5.1.2 Análise Metalográfica

Conforme mencionado anteriormente, todos os tipos de material das amostras foram submetidos à análise metalográfica. As imagens referentes à amostra em aço ao carbono sem revestimento (C2-A), estão explicitadas nas Figuras 5.1 e 5.2.

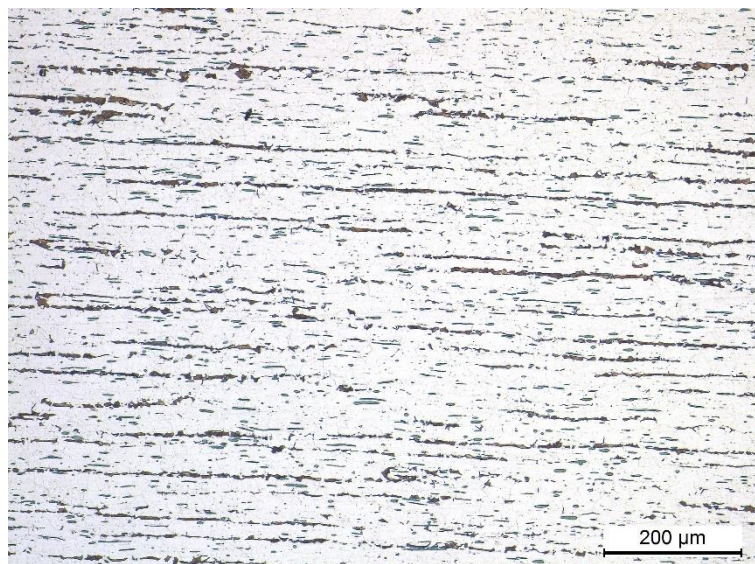


Figura 5.8: Amostra retirada de campo em aço ao carbono, com 100 vezes de aumento: Matriz ferrítica (branco) e perlita (escuro), e sulfetos (fase na cor preta).
Fonte: Autor, 2023.

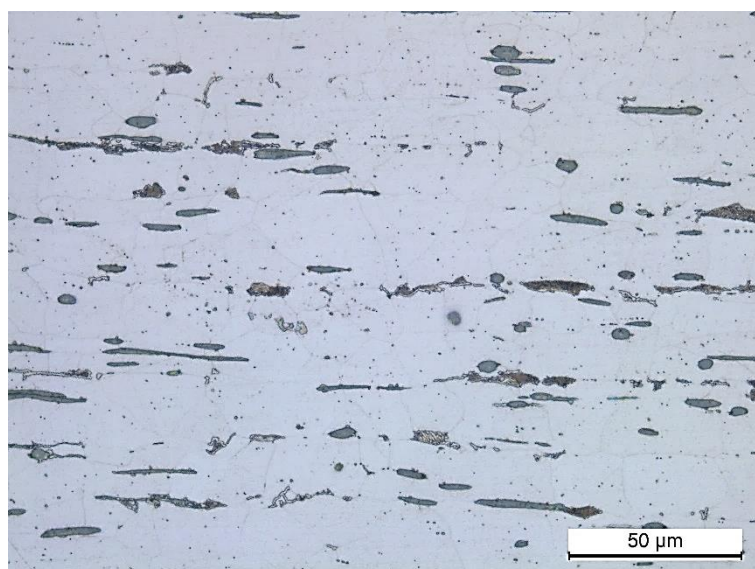


Figura 5.9: Amostra retirada de campo em aço ao carbono, com 500 vezes de aumento: Detectaram-se sulfetos devido ao alto teor de enxofre dos aços *SAE/AISI 1215*.
Fonte: Autor

Através das imagens adquiridas, conforme Fig. 5.1 e 5.2, nota-se uma elevada presença de inclusões, em tons de cinza mais escuro, caracterizando o aço *SAE/AISI 1215*. O alto teor de enxofre e fósforo, bem como manganês, se confirma ao em comparação aos resultados obtidos na espectrometria. Além disso, como esperado a partir do baixo teor de carbono na composição obtida, se evidência a presença das fases típicas de aços baixo carbono, em tons mais claros a ferrita (α), e mais escuros a perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$).

Para o caso da amostra de aço ao carbono nova (TNZ), contemplado pela norma SAE/AISI 1010 (Figura 5.4 e Figura 5.3), nota-se menor quantidade de inclusões presente na microestrutura, porém ainda em quantidades excessivas, que podem ser prejudiciais ao material, dependendo do seu uso.



Figura 5.10: Amostra nova em aço ao carbono, com 100 vezes de aumento: Matriz ferrítica (branco) e perlita (escuro).

Fonte: Autor, 2023.

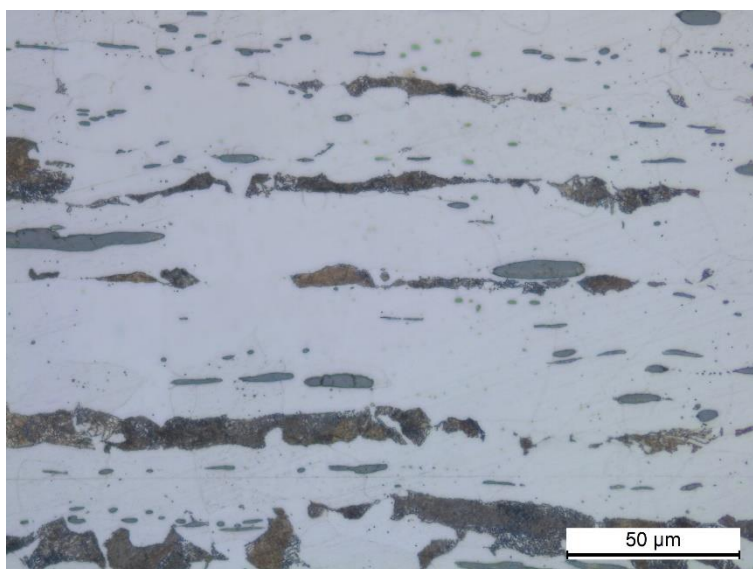


Figura 5.11: Amostra nova em aço ao carbono, com 500 vezes de aumento: Matriz ferrítica (branco), perlita (escuro) e inclusões de sulfetos (cinza).

Fonte: Autor.

A amostra em aço inoxidável (TNI), tendo suas imagens expostas pelas Figuras 5.5 e 5.6, apresentou composição, conforme espectrometria (Tabela 5.1), característica de acordo com a norma *SAE/AISI 316L*. Como esperado, os grãos apresentam uma certa homogeneidade

quanto ao seu tamanho, com predominância da fase austenita (γ) e ferrita delta (δ) em menor quantidade alocadas nos contornos de grão. Os pontos escuros, mais evidentes com 500 vezes de aumento (Fig. 5.6), evidenciam pites de corrosão, provenientes de um possível ataque realizado de maneira inadequada.

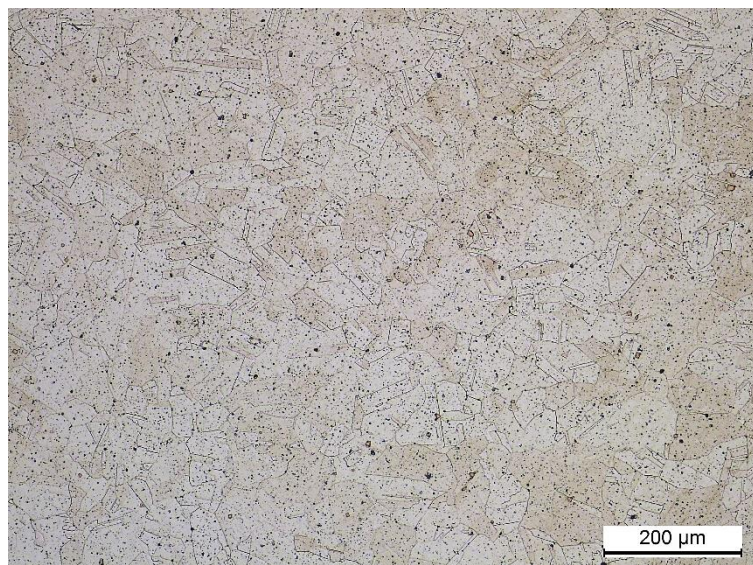


Figura 5.12: Amostra nova em aço inoxidável, com 100 vezes de aumento: O ataque realizado com ácido oxálico não foi realizado de maneira adequada, indicado pelos pites (pontos escuros).

Fonte: Autor, 2023.

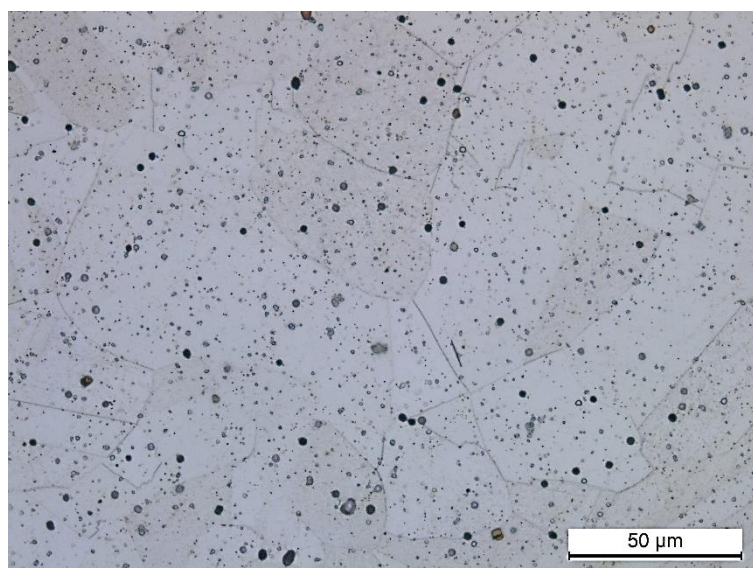


Figura 5.13: Amostra nova em aço inoxidável, com 500 vezes de aumento: Evidencia-se os pites de corrosão devido ao ataque químico realizado de forma inadequada.

Fonte: Autor.

5.2 Análise do produto de corrosão

A fim de identificar se os produtos de corrosão formados estavam sendo influenciados pela utilização do fertilizante NPK utilizado, as amostras recebidas de campo foram submetidas à análise de MEV/EDS, onde foram obtidas as composições das amostras C2-A, C2-B, T2-A e T2-B, e então determinada a média (Figura 5.7). A partir das composições obtidas, é possível observar a presença de quantidades significativas de fósforo, que é um elemento presente na formulação do fertilizante. Os fertilizantes contendo sais como nitrato de amônio (NH_4NO_3), fosfato mono e diamônio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), cloreto de potássio (KCl), reduzem significativamente a resistividade elétrica do solo, proporcionando em uma maior tendência corrosiva (GENTIL, 2011). É importante destacar que a análise de EDS, nesse caso, é qualitativa e foi realizada com objetivo de comparar as amostras entre si.

A predominância é de óxidos de ferro confirma ocorrência do severo processo corrosivo nas amostras coletadas em campo. A baixa presença de zinco também indica que maior parte do revestimento galvanizado foi corroído.

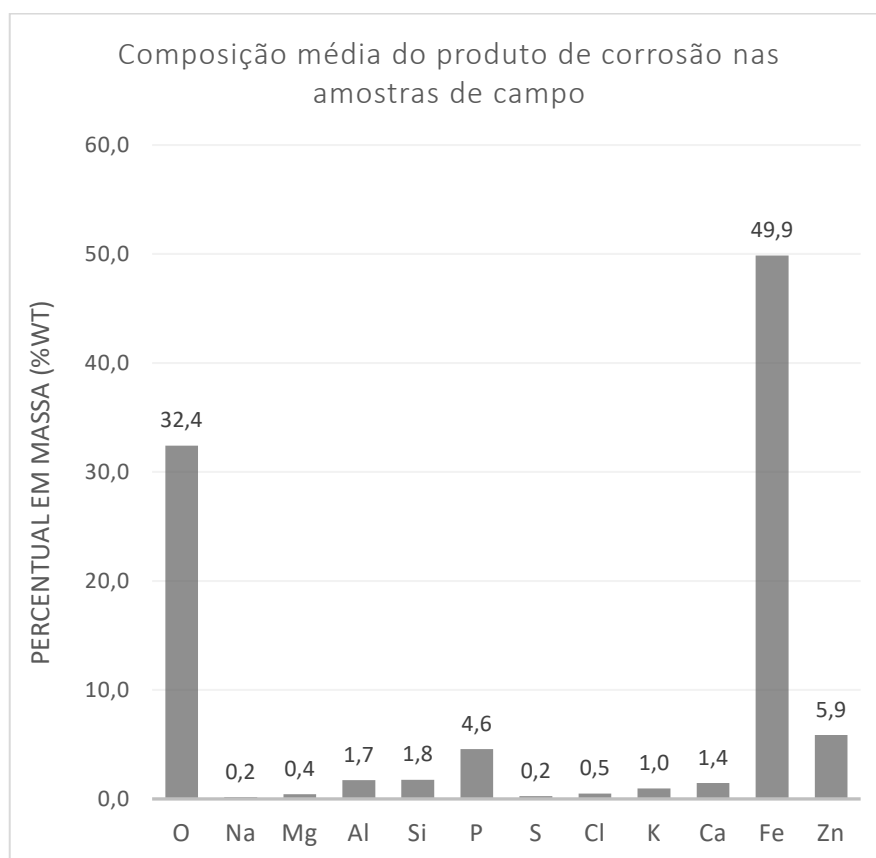


Figura 5.14: Composição dos produtos de corrosão de amostras de campo.
Fonte: Autor, 2023.

5.3 Ensaio Eletroquímico de Polarização Potenciodinâmica

A partir dos ensaios eletroquímicos realizados, os valores obtidos a partir das curvas de polarização, representam o desempenho dos materiais em um meio aquoso contendo o fertilizante NPK mencionado anteriormente. As curvas de polarização obtidas estão expressas na Figura 5.8.

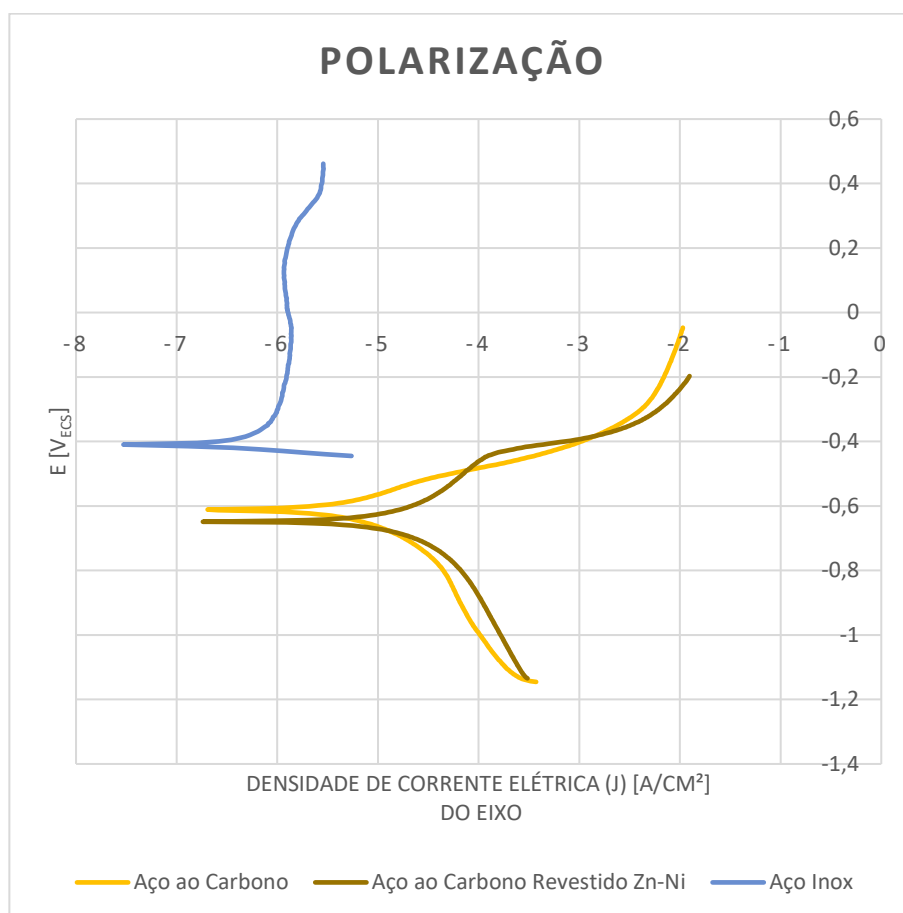


Figura 5.15: Curvas de polarização obtidas durante ensaios. As curvas apresentadas são referentes às maiores taxas de corrosão encontradas para cada material.

Fonte: Autor, 2023.

A partir dos potenciais observados na Fig. 5.8, nota-se uma diferença significativa entre os potenciais do aço inoxidável, o que implica diretamente em um E_{CORR} mais elevado e J_{CORR} menor, proporcionando uma taxa de corrosão menor. Os valores de densidade de corrente, para os aços ao carbono, estão deslocados para valores maiores, o que indica uma maior atividade corrosiva nesses materiais. Utilizando as retas de Tafel, através do software NOVA 2.1, obteve-se as taxas de corrosão, E_{CORR} e J_{CORR} , conforme Tabela 5.3.

Para o cálculo da taxa de corrosão, utilizando o valor do potencial de corrosão E_{Corr} , para um dado potencial E , diferente de E_{Corr} , e o valor da corrente Δi , que é a diferença entre a densidade de corrente anódica i_a e a densidade de corrente catódica i_c , conforme Eqs. (7) e (8):

$$\Delta i = i_a - |i_c| \quad (7)$$

$$\Delta E = E - E_{Corr} \quad (8)$$

Após rearranjos nas equações (7) e (8), obtém-se:

$$\Delta i = i^* \left[\exp\left(\frac{2,303\Delta E}{b_a}\right) - \exp\left(\frac{2,303\Delta E}{b_c}\right) \right] \quad (9)$$

A Eq. (9), conhecida também como a equação de Wagner-Traud (WOLYNEC, 2003). Os parâmetros b_a e b_c são os declives de Tafel das retas de polarização das reações anódica e catódica. O conhecimento dos parâmetros b_a e b_c permite que a equação de Wagner-Traud seja utilizada na determinação da taxa de corrosão i^* a partir de um par de valores (ΔE , Δi) ou por regressão linear (WOLYNEC, 2003).

Tabela 5.3: Potencial (E) de corrosão, corrente (i) de corrosão, densidade de corrente (J) e taxa de corrosão obtidos.

Amostra	E_{Corr} [V _{ECS}]	J_{Corr} [A/cm ²]	Taxa de Corrosão [mm/ano]
Aço ao carbono sem revestimento	-0,61	1,61E-05	0,19
Aço com revestimento Zn-Ni	-0,65	2,41E-05	0,72
Aço Inoxidável	-0,41	4,32E-06	0,050

Fonte: Autor, 2023.

Conforme esperado, os resultados (Tabela 5.3) apontam o desempenho do aço inoxidável AISI 316L como o melhor em termos de resistência à corrosão, no meio estudado. Conforme a taxa obtida para esse material, em um cenário hipotético, a vida útil foi estimada por:

$$365 \text{ dias} - 0,050 \text{ mm}$$

$$x[\text{dias}] - 1 \text{ mm}$$

Considerando 1 mm de camada corroída pelo eletrólito, ter-se-ia:

$$x \approx 7019 \text{ dias} \approx 19 \text{ anos}$$

Porém, há de se destacar que as amostras revestidas apresentaram taxas de corrosão consideráveis, uma vez que para efetivamente prejudicar o componente, a camada revestida deverá ser totalmente oxidada, iniciando assim o processo corrosivo no substrato. A espessura da camada revestida torna-se o ponto chave para determinar o tempo de operação estimado para este caso. As medições realizadas por sonda eletromagnética nas amostras revestidas, em 20 aferições em diferentes pontos da superfície, apresentaram uma espessura média de 7,6 μm .

A estimativa de vida útil do revestimento Zn-Ni, sob imersão no eletrólito contendo o fertilizante NPK estudado, foi determinada a partir da taxa de corrosão obtida e da espessura do revestimento, conforme abaixo:

$$365 \text{ dias} - 0,72 \text{ mm}$$

$$x[\text{dias}] - 0,0076 \text{ mm}$$

Logo, a vida útil do revestimento será:

$$x \approx 4 \text{ dias}$$

Após a corrosão do revestimento, o eletrólito atacará o substrato de aço ao carbono, cuja taxa obtida foi 0,187 mm/ano. O tempo restante do componente em operação, será determinado pelas características dimensionais, que neste estudo, não foram avaliadas. Hipoteticamente, considerando uma parede do componente de 1 mm, ter-se-ia:

$$365 \text{ dias} - 0,187 \text{ mm}$$

$$x[\text{dias}] - 1 \text{ mm}$$

Logo, vida útil do substrato em aço SAE/AISI 1010 será

$$x \approx 1921 \text{ dias} \approx 5,26 \text{ anos}$$

e a vida útil total do componente:

$$\text{Vida Útil total} = 4 \text{ dias} + 1921 \text{ dias} = 1925 \text{ dias} = 5,27 \text{ anos}$$

É importante considerar que esse tempo de vida útil foi estimado para uma corrosão homogênea e generalizada. No caso de uma corrosão localizada, esse tempo pode diminuir drasticamente.

Além disso, esses testes realizados em escala de bancada não eliminam a necessidade de um estudo em campo para avaliar as formas de corrosão e a velocidade de corrosão *in situ*, ou seja, nas condições de trabalho.

5.4 Relação de Custo-benefício

Além dos componentes metálicos de uma mangueira hidráulica, o tubo flexível é um elemento chave para a escolha do material utilizado nos terminais. De acordo com informações do fornecedor Hansa-Flex, por exemplo, os itens flexíveis fornecidos possuem validade determinada, ou seja, é necessário analisar se as taxas de corrosão serão coerentes com a vida útil do restante da mangueira. A vida útil para os materiais de mangueira está especificada na norma *DIN 20066* (Figura 5.9), onde os terminais e tubo flexível devem ser montados em até 4 anos desde sua fabricação, o armazenamento deve ter o período máximo de 2 anos, e operação, 4 anos.

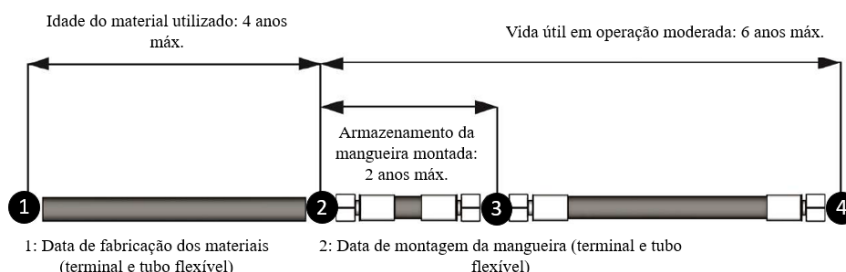


Figura 5.16: Representação de recomendações do fornecedor Hansa-Flex, conforme norma DIN-20066.

Fonte: Autor.

Para casos de operação mais severas, a norma alemã *DGUV 113-020* contempla as recomendações de manuseio e vida útil de mangueiras hidráulicas para estes casos, onde o tempo mencionado anteriormente é reduzido, de acordo com as pressões de operação, tempos de ciclo, picos de pressão e tipo de fluido.

De acordo com o fornecedor Hansa-Flex, os preços cotados de cada terminal em 30 de agosto de 2023 estão na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Cotação de componentes pela Hansa-Flex.

Item	Quantidade	Valor (R\$)
Terminal 11/16" prensado em aço SAE/AISI 1010 com Zn- Ni	1,000	11,25
Terminal 11/16" prensado em aço SAE/AISI 316L	1,000	162,66
Mangueira Flexível (1 m) SAE100 R17	1,000	18,21

Fonte: Hansa-Flex do Brasil LDTA, 2023.

Logo, nota-se a diferença de 15 vezes entre os valores dos materiais, o que não é justificado pelo tempo de vida estimado em relação ao tempo máximo de utilização dos tubos flexíveis. Portanto, a utilização do aço inoxidável SAE/AISI 316L seria viável apenas em terminais e conexões que pudessem ser reutilizadas.

6.0 CONCLUSÕES

Conforme valores obtidos de vida útil dos materiais *SAE/AISI 1010* sem revestimento, *SAE/AISI 1010* com Zn-Ni e *SAE/AISI 316L* analisados, sendo as taxas de corrosão, respectivamente, 0,187, 0,72 e 0,050 mm/ano, afirma-se que os componentes em aço inoxidável *SAE/AISI 316L* são extremamente eficazes em termos de resistência à corrosão imersos no fertilizante estudado. A relação custo-benefício, para terminais prensados, se torna o ponto chave para a seleção deste material, uma vez que sua vida útil será muito superior ao tubo flexível. Caso o terminal em análise seja reutilizável, este material se torna uma boa opção. Em termos de manutenção, a parada para a troca da mangueira será totalmente dependente da condição do tubo flexível, uma vez que a vida útil do terminal em aço inoxidável é de aproximadamente 20 anos, de acordo com os resultados obtidos a partir dos ensaios eletroquímicos.

O aço *SAE/AISI 1010* revestido com eletrodeposição de Zn-Ni, apesar da elevada taxa de corrosão neste meio (0,72 mm/ano), apresenta a melhor relação custo-benefício. Considerando que o tubo flexível da mangueira possui uma validade de 6 anos, sendo 2 em ambiente controlado e 4 sob operação, a vida útil estimada de 5,27 anos garante o funcionamento do componente, porém com prováveis indicativos visuais de corrosão generalizada nos terminais. A manutenção poderá ser um entrave, pois caso ocorra alguma troca de mangueira antes do final da vida útil, deverá ser monitorada, para que as trocas sejam realizadas em bateladas no tempo correto.

A seleção de materiais para a construção de mangueiras flexíveis e utilização em semeadoras de grãos se torna preferencial conforme requisitos estabelecidos pelo escopo do projeto, como o aspecto visual e plano de manutenção do componente por exemplo, assim como a viabilidade financeira.

7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos estudos realizados na presente pesquisa, tópicos como a avaliação de diferentes tratamentos de superfície nos terminais, compatíveis em custo e vida útil para utilização em sistemas hidráulicos de semeadoras-adubadoras de precisão. A avaliação de tubos flexíveis de maior durabilidade e bom custo-benefício são válidos para trabalhos futuros.

Além disso, o monitoramento *in situ* dos terminais de mangueiras flexíveis durante um maior período de tempo, bem como ensaios de imersão e testes que avaliem os efeitos da corrosão nas propriedades mecânicas destes componentes são estudos que podem complementar seguintes pesquisas e fomentar a otimização nesta aplicação.

8.0 REFERÊNCIAS

ANWAR, Shams *et al.* Optimization of zinc-nickel film electrodeposition for better corrosion resistant characteristics. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 97, n. 9, p. 2426–2439, 2019.

AWAD, Mahmoud I.; ALKELANI, Ali A. Failure Mode Analysis of Mobile Equipment Hydraulic Leaks. **Journal of Pressure Vessel Technology**, [s. l.], v. 134, n. 3, p. 034502, 2012.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels: microstructure and properties**. 3rd eded. Amsterdam ; Boston: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2006.

CALLISTER, JR, William D.; RETHWISCH, David G. **MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING, an introduction**. 09. ed. [S. l.: s. n.], 2013.

CEDRIM, F. A. *et al.* Effects of the zinc and zinc-nickel alloys electroplating on the corrodibility of reinforced concrete rebars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 595–605, 2016.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, Principais tipos**. Sao Paulo: ABM, 2008.

CONHEÇA AS CONEXÕES HIDRÁULICAS E SUAS APLICAÇÕES. *Em*: LENZ BRASIL. 18 maio 2022. Disponível em: <https://www.lenzbrasil.com/2022/05/18/conheca-as-conexoes-hidraulicas-e-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 19 ago. 2023.

DA SILVA, Antonio Alberto *et al.* Revista Ceres. **Sistema de Plantio Direto na Palhada e seu impacto na agricultura brasileira**, [s. l.], n. Julho/Agosto, 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3052/305226808017.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2023.

ESPÍNDOLA, Paulo; LUIS, André. FERTILIZANTES: CÁLCULO DE FÓRMULAS COMERCIAIS. **FERTILIZANTES: CÁLCULO DE FÓRMULAS COMERCIAIS**, [s. l.], 2011.

FENDT INTERNATIONAL | THE AGRICULTURAL MACHINERY MANUFACTURER. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.fendt.com/int/>. Acesso em: 5 set. 2023.

FILHO, Jair José Padilha. Desenvolvimento de Conexões Hidráulicas: Aplicação em Sistemas de Basculamento de Cabines de Caminhões no Mercado Brasileiro. **Desenvolvimento de Conexões Hidráulicas: Aplicação em Sistemas de Basculamento de Cabines de Caminhões no Mercado Brasileiro**, [s. l.], 2015.

GASSEN, Dirceu. Plantio Direto. **ADUBAÇÃO VERDE E O PLANTIO DIRETO**, [s. l.], n. Março/Abril, 2010. Disponível em: Acesso em: 23 ago. 2023.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. eded. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HAVLIN, John *et al.* **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. Eighth edition. Tamil Nadu, India: Pearson, 2016.

IRON AND STEEL SOCIETY (org.). **Steel products manual. Stainless steels**. Warrendale, PA: Iron & Steel Society, 1999.

KRAUSS, George. **Steels: processing, structure, and performance**. Materials Park, Ohio: ASM International, 2005.

LYON, S B. 3.01 Corrosion of Carbon and Low Alloy Steels. [s. l.], 2010.

MOREIRA, Danna Rodrigues. DESENVOLVIMENTO DE ADSORVENTES NATURAIS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE GALVANOPLASTIA. **DESENVOLVIMENTO DE ADSORVENTES NATURAIS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE GALVANOPLASTIA**, [s. l.], 2010.

SANCHES, Fernanda Tartarini. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS. [s. l.], 2017.

SHREIR, L. L.; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, G.T. **Corrosion: Metal/Environment Reactions**. 03. ed. [S. l.: s. n.], 1994.

SILVEROL, Aline Carneiro. **Processo Humifert para fertilizantes alternativos organofosfatados: obtenção a partir do minério de Angico dos Dias, caracterização dos compostos e avaliação da eficiência agrônômica**. 2006. Mestrado em Geoquímica dos Processos Exógenos - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44142/tde-21032007-154021/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

SILVEROL - 2006 - PROCESSO HUMIFERT PARA FERTILIZANTES ALTERNATIVOS.PDF. , [s. d.]. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44142/tde-21032007-154021/publico/ACS.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2023.

TOMACHUK, Célia R. Revestimentos de zinco sobre aços e suas aplicações. **Revestimentos de zinco sobre aços e suas aplicações**, [s. l.], p. 8, 2015.

TUDO O QUE VOCÊ PRECISA SABER SOBRE TERMINAIS HIDRÁULICOS. *Em*: LENZ BRASIL. 8 set. 2022. Disponível em: <https://www.lenzbrasil.com/2022/09/08/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-terminais-hidraulicos/>. Acesso em: 19 ago. 2023.

WOLYNEC, Stephen. **TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS EM CORROSÃO**. [S. l.: s. n.], 2003.

ZOSKI, Cynthia G. (org.). **Handbook of electrochemistry**. 1st eded. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2007.