

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**Análise de corrosão do aço DIN 42CrMo4
tratado superficialmente por metalização de
zinco**

**Helison de Sousa Barbosa
Jonathas Depetris**

**Pindamonhangaba - SP
2024**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**Análise de corrosão em aço DIN 42CrMo4 tratado
superficialmente por metalização de zinco**

**Helison de Sousa Barbosa
Jonathas Depetris**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação no Curso Superior de Tecnologia
em Mecânica – Processos de Soldagem

Orientadora Prof.a Dra. Ana Beatriz Abrahão

**Pindamonhangaba - SP
2024**

B238a Barbosa, Helison de Sousa.

Análise de corrosão em aço DIN 42CrMo4 tratado superficialmente por metalização de zinco / Helison de Sousa Barbosa; Jonathas Depetris / FATEC Pindamonhangaba, 2024.
45f.; il.

Orientadora: Professora Dr.^a Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2024

1. Aço DIN 42CrMo4. 2. Revestimento metálicos. 3. Metalização de Zinco. 4. Corrosão. I. Barbosa, Helison de Sousa. II. Depetris, Jonathas. III. Abrahão, Ana Beatriz Ramos Moreira. IV. Título.

CDD 620

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“ANÁLISE DE CORROSÃO DO AÇO DIN
42CRMO4 TRATADO SUPERFICIALMENTE POR
METALIZAÇÃO DE ZINCO”.**

**Jonathas Depetris
Helison de Sousa Barbosa**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Mecânica: Processos de
Soldagem.

Comissão Examinadora



Orientador – Profa. Dra. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão



Membro – Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho



Membro – Tecnólogo Ricelmo de Oliveira Pena

Pindamonhangaba, 11 de dezembro de 2024.

DEDICATÓRIA

ALUNO 1

Dedico esta obra a minha esposa Juliana e filho Vitorio e ao meu colega Jonas Depetris sem o qual eu não haveria concluído meu trabalho de graduação e também minha orientadora Professora Dra. Ana Beatriz.

ALUNO 2

A minha família, iniciando pela minha Esposa pela compreensão e paciência em minha ausência no período de presença na Fatec e períodos dedicados ao TG, aos meus filhos pela paciência em muitos períodos de ausência em todos âmbitos de cuidados com eles.

AGRADECIMENTO

ALUNO 1

A Deus em primeiro lugar por ter me acompanhado em todo o processo desde o início do curso ao final da apresentação do Trabalho de Graduação.

Agradeço minha família pelo apoio e a todos que de uma forma contribuíram para que pudéssemos realizar este trabalho, desde nossa Professora Dra. Ana Beatriz ao nosso amigo e companheiro de trabalho Ricelmo que nos apoiou com obtenção das amostras e apoio técnico e ao meu colega Jonathas Depetris por todo apoio na realização do Trabalho de Graduação.

ALUNO 2

Primeiramente agradeço a Deus pela capacidade e palavra nos momentos difíceis, novamente agradeço minha família pelo apoio e compreensão.

À professora e doutora Ana Beatriz Abrahão que não mediu esforços, nos apoiou na orientação deste trabalho.

A todos que de uma forma contribuíram para realização deste trabalho, desde meus colegas de fábrica em especial ao Ricelmo Pena que nos auxiliou na aquisição das amostras e aos nossos colegas que realizaram a metalização das amostras, também nossos colegas da Fatec que nos auxiliaram nos ensaios necessários para o trabalho.

Jesus é o caminho a verdade e a vida.

João 14:6.

BARBOSA, Helison de Sousa; DEPETRIS, Jonathas **Análise corrosão do aço DIN 42CrMo4 tratado superficialmente por metalização de zinco**.2024. 45p. Graduação em Mecânica – Processos de Soldagem. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

RESUMO

A corrosão é um fenômeno de degradação dos materiais metálicos que resulta em perdas econômicas significativas em diversas indústrias, além de representar um risco para a segurança e a durabilidade das estruturas, sendo necessário entender e conhecer os seus aspectos e as suas consequências. Por outro lado, a aplicação de revestimentos protetores, como metalização, é uma das estratégias mais comuns para mitigar esse problema. A análise potenciodinâmica é uma técnica eletroquímica poderosa e sensível para estudar os processos de corrosão, permitindo investigar a cinética e os mecanismos de corrosão de metais em diferentes ambientes e condições. Esse projeto visa o estudo da combinação desta técnica com a aplicação de metalização, oferecendo uma abordagem abrangente para entender a proteção anticorrosiva fornecida pelos revestimentos.

Palavras-chave: Aço DIN 42CrMo4. Revestimentos metálicos. Metalização de Zinco Corrosão.

BARBOSA, Helison de Sousa; DEPETRIS, Jonathas Corrosion analysis of DIN 42CrMo4 steel superficially treated by zinc metallization. 2024. 45p. Bachelor of Science in Mechanics – Welding Processes. Pindamonhangaba Faculty of Technology. Pindamonhangaba. Pindamonhangaba 2024.

ABSTRACT

Corrosion is a phenomenon of degradation of metallic materials that results in significant economic losses in several industries, in addition to representing a risk to the safety and durability of structures, making it necessary to understand and know its aspects and consequences. On the other hand, the application of protective coatings, such as metallization, is one of the most common strategies to mitigate this problem. Potentiodynamic analysis is a powerful and sensitive electrochemical technique for studying corrosion processes, allowing the investigation of the kinetics and mechanisms of corrosion of metals in different environments and conditions. This project aims to study the combination of this technique with the application of metallization, offering a comprehensive approach to understanding the anti-corrosion protection provided by coatings.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços..... 17

Tabela 2 - Equivalência do aço nas normas DIN e SAE 18

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo a arco elétrico	24
Figura 2 - Extrapolação das retas de Tafel	26
Figura 3 – Célula de polarização.....	27
Figura 4 - Medição de espessura do zinco.....	28
Figura 5 - Anel usinado.....	29
Figura 6 - Amostras cortadas.....	29
Figura 7 - Máquina de serra fita Franho modelo SFCI320A.....	29
Figura 8 - Metalização das amostras	30
Figura 9 - Medição das amostras	30
Figura 10 - Cortadora metalográfica modelo CM80	31
Figura 11 - Célula eletroquímica utilizada	32
Figura 12 - Equipamento potenciostato da marca AUTOLAB.....	32
Figura 13 - Lixadeira estacionária.....	33
Figura 14 - Politriz Fortel	34
Figura 15 - Embutidora AROTEC com amostra embutida.....	34
Figura 16 - Microscópio Olympus CX31	35
Figura -17 Estrutura de grãos do aço DIN 42CrMo4	36
Figura 18 - Curvas de polarização da amostra bruta sem revestimento	37
Figura 19 - Resultado de Análise por Tafel para a amostra bruta	38
Figura 20 - Curva de polarização do aço revestido	39
Figura 21 - Análise de Tafel para a amostra com revestimento 150-200.....	40
Figura 22 - Cuervas de polarização de amostra bruta e revestida	41
Figura 23 - Amostra bruta, ampliação de 50X antes do ensaio de corrosão	42
Figura 24 - Amostra bruta, ampliação de 50X após o ensaio de corrosão	42
Figura 25 - Macrografia das amostras revestidas antes do ensaio de corrosão	43
Figura 26 - - Macrografia das amostras revestidas após o ensaio de corrosão.....	43

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1.OBJETIVOS GERAIS.....	16
1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3.JUSTIFICATIVA	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 AÇO 42CRMO4	17
2.2 CORROSÃO EM AÇOS.....	18
2.2.1 CORROSÃO QUÍMICA.....	18
2.2.2. CORROSÃO ELETROQUÍMICA	18
2.2.3. FORMAS DE CORROSÃO NO AÇO.....	19
2.3. MÉTODOS DE PROTEÇÃO A CORROSÃO	20
2.3.1 INIBIDORES ANÓDICOS	21
2.3.2 INIBIDORES CATÓDICOS	21
2.3.3 PROTEÇÃO ANÓDICA	21
2.3.4 PROTEÇÃO CATÓDICA	22
2.3.5 REVESTIMENTOS METÁLICOS.....	22
2.3.6 METALIZAÇÃO DE ZINCO POR ARCO ELÉTRICO	23
2.3.7. MÉTODOS DE MONITORAMENTO À CORROSÃO	24
2.4 ENSAIOS ACELERADOS	25
2.4.1 IMERSÃO SALINA	25
2.4.2. ELETROQUÍMICO POTENCIOSTÁTICO.....	25
2.4.3 ENSAIOS EM CAMPO.....	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS.....	29
3.2. MÉTODOS	30
3.2.1. PROCESSO DE METALIZAÇÃO	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36

1. INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que o estudo da corrosão se deu início no ano de 1949 a partir do estudo realizado pela United Nations Scientific Conference on the Conservation and Utilization of Resources, nos Estados Unidos da América sob a supervisão da ONU, onde foi apresentado um custo estimado da corrosão na ordem de 5,5 bilhões de dólares naquele país, pelo professor H. H. Uhlig, do Massachusetts Institute of Technology – MIT. (GENTIL, 2011).

Dentre os métodos de combate a corrosão existe aspersão térmica (thermal spray) também conhecida por metalização, processo pelo qual gera uma proteção catódica ao metal base, isto é: garantir a interrupção da corrente de corrosão gerada pela diferença de potencial entre o anodo (meio corrosivo) e catodo (material de uso), com aplicação de um metal de sacrifício, dentre muito usados vamos citar o Zinco que é mais reativo, assim sendo estará mais sujeito a corrosão protegendo o aço carbono que é o metal base, ou seja, o material do qual exige proteção ante a corrosão. Nunes (2007). O aço carbono que é o metal base desse estudo é o aço 42CrMo4 da norma DIN EN 10083-3, material com matriz martensita revenida que alia boas resistência a tração, resistência ao impacto e boa tenacidade (CALLISTER, 2013), muito usado para fabricação de rolamentos industriais de pequeno e grande porte, este último, quando usado para fabricação de rolamentos para torre eólica se faz necessário a aplicação da metalização de zinco na parte exterior do anel onde fica exposta ao ambiente atmosférico corrosivo.

O processo de metalização que é fruto deste trabalho é constituído por uma pistola alimentada por dois eletrodos consumíveis que se encontram automaticamente na saída da tocha, é aplicada uma diferença de potencial nos eletrodos iniciando um arco elétrico afim de fundir os eletrodos, um gás usualmente ar comprimido é aplicado na zona do arco, atomizando os eletrodos fundidos e projetando as partículas sobre um substrato preparado, (Lima C. C., e Trevisan R, 2007).

1.1. OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem por finalidade realizar o estudo da corrosão da camada de 200µm metalizada por Zinco em amostras do aço Din 42CrMo4, esta é a camada de revestimento de Zinco utilizadas nos rolamentos de torre eólica produzidas por determinada empresa, o estudo da corrosão será feito em amostras do aço bruto e da amostra referida a cima no laboratório de corrosão da Fatec de Pindamonhangaba, onde utilizaremos o equipamento Potenciostato

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Analisar a face coberta com zinco com Microscópio Óptico
- ✓ Analisar a microestrutura do composto de zinco
- ✓ Realizar o estudo acelerado de corrosão no Potenciostato
- ✓ Avaliar a resistência a corrosão da espessura de 200 µm do revestimento de metalização por Zinco.

1.3. JUSTIFICATIVA

O processo de metalização, revestimento metálico por arco elétrico é muito utilizado a fim de aumentar a vida útil do metal base frente a corrosão do ambiente instalado, o Zinco é uma material resistente a corrosão e muito utilizado como material de sacrifício por ser um material mais reativo em virtude de seu potencial padrão que é mais baixo, desse modo o Zinco é mais propenso a oxidação, e devido a passividade que é criada em ambiente corrosivo o torna mais resistente a corrosão, desse modo é interessante testar a sua resistência a corrosão ao ambiente salino.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço 42CrMo4

A norma DIN EN 10083-3:2006-10, caracteriza o aço 42CrMo4 na sua fabricação e uso na indústria, sendo assim determinando as suas propriedades mecânicas, e químicas e meio de fabricação. Este aço é definido por alta resistência baixa liga (ARBL) em virtude da sua composição química composta por Carbono 0,38-0,45 aliado aos elementos de liga Cromo 0,90-1,20 e Molibdênio 0,15-0,30 (CHIAVERINI, 1986).

Segundo André Costa e Paulo Mei (2010), a finalidade do Cromo aliado a proporção de Carbono e Molibdênio, possui a finalidade de aumentar a endurecibilidade moderada na fase austenita, já na fase ferrita endurece ligeiramente e aumenta a resistência a corrosão. A contribuição do Molibdênio para a liga na fase austenita é o forte aumento da endurecibilidade quando $Mo < Cr$ que é o caso dessa liga, na fase ferrita produz o sistema endurecível por precipitação nas ligas Fe-Mo. Segue abaixo principais funções dos elementos de liga na Tabela 1:

Tabela 1 - Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços

Elementos	Principais funções
Cr	1- Aumenta a resistência a corrosão e oxidação. 2- Aumenta a endurecibilidade. 3- Melhora a resistência a altas temperaturas. 4- Resistência ao desgaste (com alto C).
Mo	1- Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita. 2- Produz maior profundidade de endurecimento. 3- Contrabalança a tendência da fragilidade do revenido. 4- Eleva a resistência a quente, a dureza a quente e a fluência. 5- Forma partículas resistentes a abrasão.

Fonte: Adaptado do livro Aços e ligas especiais (Costa e Mei, 2010).

A norma DIN (Deutsches Institut Für Normung), Instituto Alemão de Normalização caracteriza vários segmentos da engenharia, tecnologia e serviços, dentre esses classifica os aços de somatório de ligas $\leq 5\%$ pelo teor de carbono em centésimo (HANDBOOK I, 1991). O sistema mais utilizado para designação dos aços carbono nos Estados Unidos é o SAE (Society of Automotive Engineers), também

sendo uma referência muito utilizado no Brasil, sendo assim está descrito na Tabela-2 informações cruzadas da similaridade da composição química dos aços DIN 42CrMo4 com o SAE 4140 (HANDBOOK I, 1991).

Tabela 2 - Equivalência do aço nas normas DIN e SAE

Nearest SAE grade	DIN number	Composition, wt%								
		C	Si	MN	p	S	NI	Cr	Mo	Others
		0,38		0,50				0,90	0,15	
		-		-				-	-	
4140	1,7225,42CrMo4	0,45	0,4	0,80	0,035	0,03	...	1,20	0,30	...

Fonte: HANDBOOK I, (1991)

2.2 Corrosão em aços

Segundo Jambo e Fófano (2008), de acordo com a literatura podemos definir corrosão em aços de duas formas, corrosão seca e corrosão úmida; corrosão química e corrosão eletroquímica respectivamente.

2.2.1 Corrosão química

Ocorre diretamente entre os meios envolvidos, podendo ser entre o metal e ambiente atmosférico e metal associados a substâncias alcalinas como Cl; no meio atmosférico a corrosão química é iniciada através de reações de oxidações, desta forma é formado uma película de óxido fina entre o metal e o oxigênio acelerando o processo de oxidação por um curto espaço de tempo, imediatamente esse processo decresce. Com o aumento da temperatura a película de óxido formada tende de aumentar causando perda de camada do material, assim sendo formando a corrosão

2.2.2. Corrosão eletroquímica

Ocorre em meio aquoso através de um processo elétrico por uma diferença de potencial, onde os metais envolvidos estão mergulhados numa solução eletrolítica (solução transportadora de íons), desta forma haverá troca de elétrons, onde o anodo material menos nobre em decorrência da sua polarização acima do seu potencial de eletrodo, cederá elétrons para o material mais nobre assim sendo, este material

sofrerá oxidação já o material mais nobre por estar polarizado a baixo do seu potencial de eletrodo, agira como catodo recebendo os elétrons sofrendo a redução. Nas equações a baixo está exemplificado os processos de oxidação e redução do ferro e oxigênio em meio a solução aquosa salina

Equação 1 – Reação de oxidação do Ferro



Equação 2 – Reação de redução do oxigênio



Ambas as formas de corrosão descritas acima têm o seu início de forma espontânea independente do ambiente que está alocado, aliado ou não a esforços mecânicos. A água se torna o ambiente mais agressivo aos metais por sua rica combinação de substâncias orgânicas, gases e sais oriundos de poluição atmosférica e de dejetos, diante desses fatos podemos exemplificar formas de corrosão aos metais (GIRÃO IZABELA, 2008).

2.2.3. Formas de corrosão no aço

Conforme Gentil (2011) o processo de corrosão inicia por reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que ocorre na superfície de contato do material com o meio corrosivo, todo processo de corrosão parte das reações químicas que consistem em ceder e receber elétrons chamado de oxidação-redução, nessa reação o aço sofre a redução cedendo elétrons para o meio corrosivo (oxidante), a partir dessa reação o aço sofre a deterioração de diferentes formas dependendo de diferentes mecanismos e fatores, segue formas de corrosão em aços:

➤ Corrosão uniforme

Tipo de corrosão bem comum onde toda a superfície do material é tomada pelo processo corrosivo, essa forma de corrosão é característica de materiais de baixa liga e meio corrosivo agressivo.

➤ **Corrosão por pite ou puntiforme**

De acordo com Nunes (2007) a corrosão por pite é caracterizada em aços heterogêneos que são passiváveis (película protetora formada pelo produto da corrosão) como é o caso de ligas a base de Cromo, a corrosão por pite é causada pelos íons halogenetos (Cl^- , Br^- , I^- , F^-), que rompem de forma localizada a película e provocam uma corrosão muito intensa em decorrência da alteração do pH na direção ácida, causando cavidades profundas no material.

➤ **Corrosão Intergranular e intragranular**

Os dois tipos de corrosão têm a origem nos grãos da rede cristalina do material, a diferença entre ambas é o local que inicia e forma a corrosão sendo na corrosão intergranular a formação na região do contorno de grãos, já na corrosão intragranular a formação se dá por meio dos grãos da rede cristalina, esse tipo de corrosão provoca perda da propriedade mecânica levando a fratura por pequenos esforços solicitados ao material, tipo de fratura conhecida por corrosão sob tensão fraturante (CTF). Alguns fatores que influenciam esse tipo de corrosão estão associados ao meio corrosivo com agentes específicos para cada tipo de material, exposição a temperaturas elevadas por tempo prolongado causando segregação dos elementos, e composição química da liga que pode torna-lo mais suscetível a corrosão (GENTIL, 2011).

2.3. Métodos de proteção a corrosão

Para escolha correta do melhor método de proteção a corrosão se faz necessário o estudo completo de todas as variáveis existentes, como o meio corrosivo, o conhecimento da composição química do material uma vez que pode haver incompatibilidade química com o inibidor da corrosão, para a condição de revestimentos metálicos o material de sacrifício possui a função de proteger o metal base, porém pode ser corrosivo a outros materiais próximos como é o caso das aminas que é altamente corrosiva ao cobre e as suas ligas (GENTIL, 2011).

Os métodos de proteção a corrosão vão desde a práticas adequadas ao projeto, seleção de materiais, adequação do meio, dentre todos, podemos destacar os inibidores de corrosão e proteção catódica e anódica que são mais utilizados devido ao custo benefício final para o projeto.

2.3.1 Inibidores Anódicos

Os inibidores anódicos são compostos químicos empregados ao meio com a ação de reprimir as reações anódicas no anodo, numa pilha eletroquímica o anodo sofre a oxidação (corrosão) devido à perda de elétrons, em meio a esse processo é gerado o produto da corrosão e justamente nesse fenômeno os inibidores anódicos atuam produzindo uma fina película protetora aderente e insolúvel ocorrendo a polarização anódica, por consequência a proteção corrosiva do anodo. As substâncias utilizadas como inibidores anódicos são: hidróxidos, carbonatos, silicatos, boratos e fosfatos de metais alcalino, essas substancias tem a sua aplicação controlada na sua quantidade a fim de manter a concentração a cima da linha crítica, caso contrário o inibidor perde a eficiência na formação da película protetora, deste modo ocasionando corrosão localizada; sendo assim é importante manter agitação, e velocidade de escoamento adequada e limpeza da superfície do metal (FREIRE, 2020)

2.3.2 Inibidores Catódicos

De acordo com Nunes (2007) e Gentil (2011), numa pilha eletroquímica o catodo recebe os elétrons enviados pelo eletrodo (anodo) que é encaminhado pelo eletrólito (meio) ocasionando a redução; diante dessa reação os inibidores catódicos agem fornecendo íons metálicos que reagem com a alcalinidade catódica, sendo assim produzindo uma camada insolúvel que envolve a área catódica impedindo a condução dos elétrons e difusão do oxigênio gerando uma polarização catódica, desta forma interrompendo o processo de redução na área catódica. Os inibidores catódicos usados são: sulfatos de zinco, magnésio e de níquel, a virtude dos inibidores catódicos em relação aos inibidores anódicos estão na sua dosagem que não precisam ser controladas na sua quantidade.

2.3.3 Proteção Anódica

Sabendo que a proteção anódica é utilizada em armazenamento e processamento de fluidos muito agressivos, é requisitado materiais que se passavam ao meio instalado e possuem pequena corrente suficiente para manter o estado passivo, deste modo se tornando economicamente viável (FREIRE, 2020).

Levando em consideração a complexidade envolvida ao meio que se quer obter a proteção anódica do metal é indispensável o estudo em laboratório utilizando uma

amostra da liga do equipamento e do eletrólito, desse modo podem ser definidas as faixas de potenciais de proteção e a corrente requerida (FERREIRA LOPES, 2019). As características fundamentais desse processo estão na sua pequena quantidade de corrente requerida para manter a passivação nos metais utilizados, necessitando de apenas um catodo auxiliar para proteção de longos trechos, as suas deficiências estão na aplicação em somente metais passiváveis como, Ferro, níquel, cromo, titânio e respectivas ligas, a sua aplicação em meios com presença de íon cloretos é comprometida, devendo manter a dosagem desse íon abaixo de 0,1N (GIRÃO IZABELA. 2008).

2.3.4 Proteção Catódica

A proteção catódica consiste em eliminar artificialmente a corrente que parte do anodo para o catodo numa pilha eletroquímica, deste modo havendo a polarização catódica do material eliminando o processo corrosivo. Esse mecanismo se dá aumentando a intensidade da corrente na pilha eletroquímica com uso de anodo de sacrifício tipo ligas de zinco, manganês e alumínio para proteção catódica galvânica, processo muito utilizado em estruturas pequenas em meios como agua do mar e solos de baixa resistência ôhmica na casa de 1500 – 6000 ohm.cm (DUTRA; NUNES, 2006). Proteção catódica por corrente impressa é promovida por uma fonte geradora externa que pode ser uma bateria ou gerador que faz a conexão dos anodos ao material do qual necessita de proteção, esse modelo é utilizado em grandes estruturas e independe da resistividade ôhmica do meio

A proteção catódica é de mais simples aplicação e manutenção uma vez que aplicada de modo correto às instalações, como dutos enterrados, submersos, estruturas subaquáticas e enterradas, cabos telefônicos, tanques submersos, cascos de navios, estruturas de perfuração de petróleo entre outras, desta forma estarão livres do processo corrosivo permanente, os revestimentos protetores para tubulações e chapas aumentam a garantia da proteção catódica (R.W. REVIE, H.H UHLIG))

2.3.5 Revestimentos Metálicos

Os revestimentos metálicos têm por objetivo a proteção por barreira, podendo ter aplicação de um pequeno filme de inibição anódica quando aplicado tinta de fundo com a base de cromato e fosfato de zinco (Zarcão). Também pode reforçar com

proteção catódica da qual necessita ser isentas de falhas por formar uma pilha galvânica entre o material e revestimento metálico aplicado, diante de falhas podendo ocasionar corrosão ao metal de base (RAMOS, 2004; NUNES, 2007).

De acordo com Gentil (2011) e Santana; Nogueira (2018) os revestimentos metálicos são utilizados com diferentes intuitos, desde a decorativa, resistente a abrasão, atrito e a corrosão. Dos métodos utilizados comercialmente estão a Cladização que consiste na aplicação de uma chapa de Inox, níquel, titânio ou tântalo de até 4mm ao metal de base por explosão, ou solda, processo eficiente e econômico uma vez que o aço carbono oferece a resistência mecânica exigida e os clads a resistência a corrosão e abrasão. A imersão a quente ou galvanização muito utilizados em estruturas sujeitas a corrosão atmosférica, é realizado através do mergulho do metal de base a um líquido aquecido de zinco desta forma o substrato de zinco adere ao metal de base gerando uma camada protetora de 20 a 120 μ m, também é realizado pelo método da eletrodeposição onde é aplicado uma corrente externa ao material que recebe os íons metálicos Z^{+} da solução onde o material é mergulhado. A deposição química é bem similar ocorrendo pela redução química dos íons metálicos existentes na solução, técnica muito utilizada em peças de geometria complexa, a cementação ocorre pela difusão do material em pó (zinco, alumínio e silício) aquecido a altas temperaturas juntamente com o metal base a ser protegido (MARQUES; GOODWIN).

2.3.6 Metalização de zinco por arco elétrico

O processo inicial para a metalização do aço Din 42CrMo4 material de estudo desse trabalho, inicia com o preparo do material através da lavagem por fosfatização utilizando um detergente próprio, após entra com o processo por jateamento com granalha de aço cubica pontiaguda afim de garantir rugosidade entre 0,85 a 0,90 μ m para melhorar aderência da metalização de zinco à metal base (LIMA; TREVISAN, 2007).

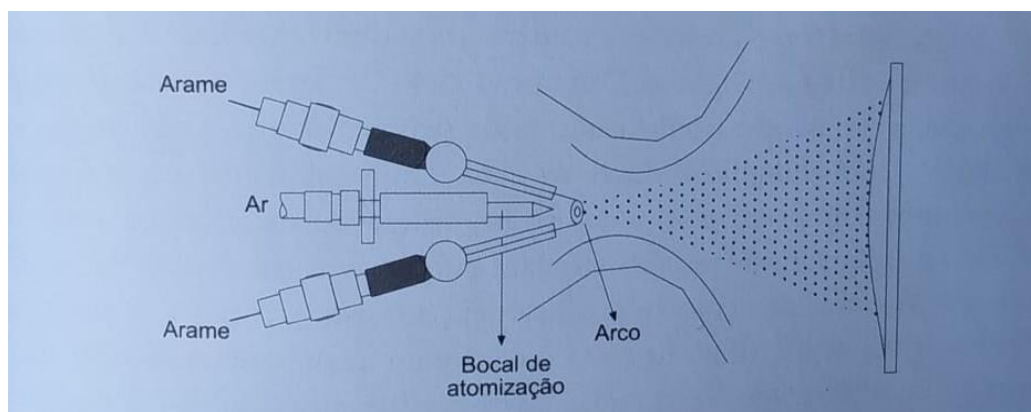
O processo de metalização por arco elétrico foi escolhido devido a sua versatilidade de aplicação em geometrias complexas, controle de espessura e melhor adesão ao substrato preparado garantindo melhor resistência a corrosão, desta forma entregando uma melhor confiabilidade independente da área onde o rolamento de torre eólica for montado (Gentil, 2011).

Na aspersão térmica a arco elétrico, EAS (electric arc apraying), também

conhecido como arco arame, WAS (wire arc process), dois eletrodos consumíveis de arame, que são isolados um do outro, avançam automaticamente para se encontrarem num ponto numa névoa de gás atomizador. Uma diferença de potencial de 18 e 40 V é aplicada através dos arames, iniciando um arco elétrico que funde as pontas dos arames eletrodos. Um gás, usualmente ar comprimido, é dirigido através do arco, atomizando o metal fundido e projetando as partículas sobre um substrato preparado (FERREIRA LOPES, 2019).

As temperaturas alcançadas na tocha de aspersão a arco elétrico atingem o ponto de fusão dos eletrodos de zinco aspergidos no metal base, com a superfície preparadas após o processo de jateamento, após o impacto com o metal base é produzido uma interação metalúrgica, zonas de difusão com o substrato preparado, estas reações formam pequenas soldadas homogêneas entregando alta resistência a tração em torno de 69 MPa ao revestimento metálico produzido (LIMA; TREVISAN, 2007). Na Figura 1 está representado o mecanismo interno da tocha usada para aspersão térmica a arco elétrico.

Figura 1 - Esquema do processo a arco elétrico



Fonte: (Lima C. C., e Trevisan R, 2007.).

2.3.7. Métodos de monitoramento à corrosão

O monitoramento da corrosão se faz necessário em grandes equipamentos e estrutura afim de garantir boa produtividade e em especial a segurança do equipamento e pessoal envolvido no processo.

Os métodos não destrutivos são realizados com uso de ultrassom, Rx, líquido

penetrante, partícula magnética afim de medir a espessura da parede da estrutura, verificar fissuras trincas entre outros similares, este método é utilizado no campo. O método analítico tem por finalidade estudar as reações químicas do meio e do material, a fim de averiguar o teor de pH, teor de oxidação e colônias microbiológicas que aumentam a cinética da corrosão, método utilizado em laboratório.

Um método bem eficaz é realizar o cálculo da taxa de corrosão em laboratório fazendo o uso de corpo de prova submetido a condição original do meio, desta forma a definição da parede das chapas utilizadas na fabricação da estrutura é definida em razão a taxa de corrosão (GENTIL, 2011; JAMBO; Fófano, 2009).

2.4 Ensaios acelerados

Segundo Nunes (2007) os ensaios acelerados são realizados em laboratórios usando corpos de provas do material podendo estar com revestimentos ou não; é simulado as condições de corrosão do meio a fim de encontrar a taxa de corrosão. Nesse estudo citaremos dois ensaios acelerados:

2.4.1 Imersão salina

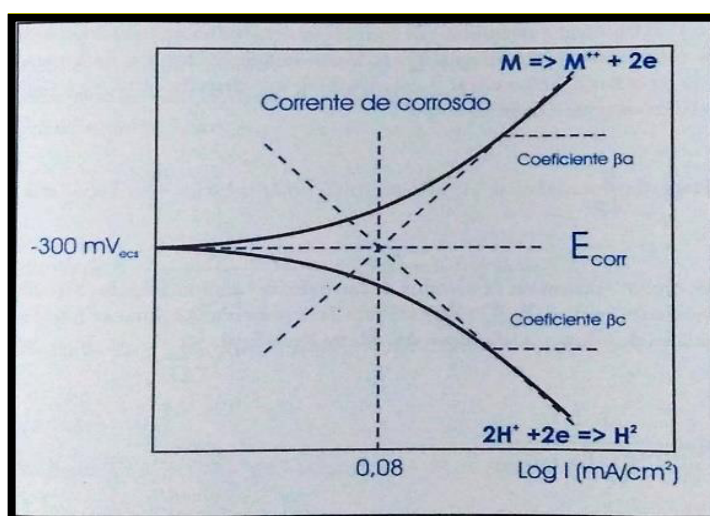
O ensaio em câmara salina (Salt Spray) é utilizado para estruturas sujeitas a exposição marinha, possui parâmetros que são ajustados em decorrência do material e meio analisado, a concentração de sal varia entre 3% e 5% de NaCl podendo ser maior dependendo do meio analisado, a temperatura varia de 35°C a 50°C dependendo do padrão de referência, tempo de exposição e pressão completam os parâmetros utilizados (PRADO; CARDOSO, 2013).

2.4.2. Eletroquímico potencioestático

O método potenciodinâmico utilizado para análise de corrosão foi desenvolvido por Marcel Pourbaix, que por meio do seu diagrama ficou definido que a relação $(E - E_o) j > 0$ para reações eletroquímicas, onde “E” é o valor da sobretensão imposta na polarização e “E_o” é o ponto de equilíbrio misto ou de repouso, “j” a densidade da corrente no equilíbrio ou no repouso (GENTIL, 2011; JAMBO; FÓFANO, 2009). O gráfico do método de extrapolação de Tafel mostrado na figura 3 elucida a reação do

circuito mostrado na figura 4, e utiliza da relação de Pourbaix para condição de: $E > E_o$, $j > 0$, ocorrerá a oxidação (corrosão), $E < E_o$, $j < 0$, ocorrerá a redução (livre de corrosão).

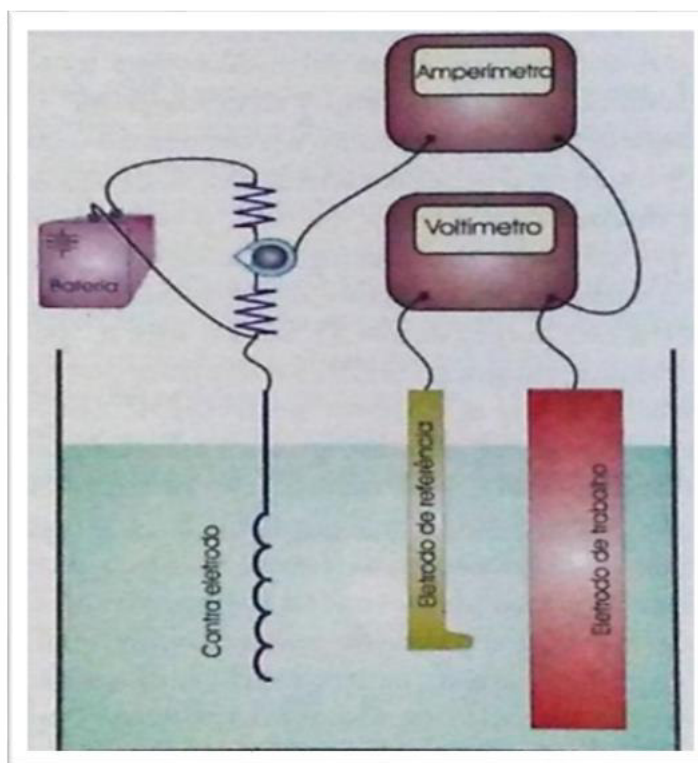
Figura 2 - Extrapolação das retas de Tafel



Fonte: Jambo, Fófano (2009)

Diante do gráfico de polarização podemos calcular a taxa de corrosão conforme a lei de Faraday a partir dos traçados das retas tangentes as curvas, anódica e catódica passando pela linha E_o que o mesmo que E_{corr} , da interseção provocada pelo encontro das retas descemos uma linha vertical até o eixo da corrente para definição da densidade da corrente. A célula de polarização utilizado no potenciostato está representado na Figura 3, o princípio de funcionamento para análise da taxa de corrosão parte da alimentação do contra eletrodo com elétrons fornecidos pela bateria, desta forma os átomos de elétrons do material de trabalho reagirão com o eletrólito, esta polarização forçará a corrosão, a movimentação dos elétrons devido à polarização existentes é captada pelo voltímetro ligado em paralelo com o eletrodo de resistência e eletrodo de trabalho, a corrente de reação corrosiva é captada pelo amperímetro ligado em série com o eletrodo de trabalho e o contra eletrodo (NUNES, 2007; JAMBO; FÓFANO, 2009).

Figura 3 – Célula de polarização



Fonte: JAMBO; FÓFANO, 2009.

2.4.3 Ensaio em campo

Podemos citar três métodos de ensaios em campo eficazes dentre todos existentes, começando pelos cupons e carretéis de testes, que são amostras do material utilizado ou para antes do projeto, materiais que podem ser utilizados no projeto, deste modo avaliando a melhor liga a ser utilizada na fabricação. Esses cupons são pesados e mergulhados no produto de trabalho e deixado por um tempo determinado, após são retirados, limpos do produto da corrosão e novamente pesados em balança de precisão 0,001 g, a sua nova massa é convertida numa taxa de corrosão em mm / ano, conforme a equação 3 (NUNES, 2007).

$$\text{Equação – 3} \quad \text{mm / ano} = \frac{3,65 \cdot \Delta m}{S \cdot t \cdot \rho}$$

S = área exposta em cm²

t = Tempo de exposição em dias

ρ = Massa específica do material
em g/cm³

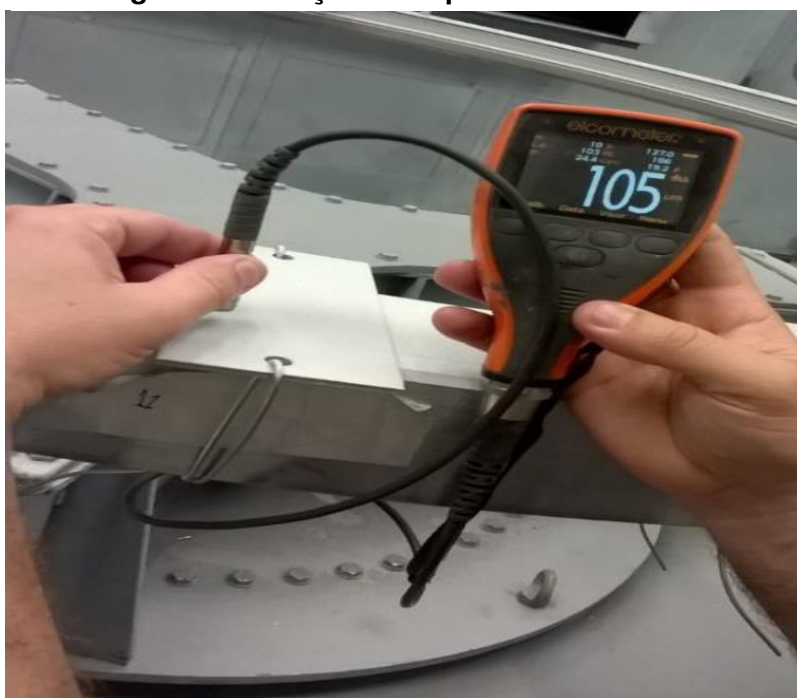
Outro método bastante utilizado é a técnica de resistência elétrica empregado em aplicações de óleo e gás, sistemas de água e estruturas enterradas, não podendo ser utilizados em meios aquosos contínuos. Este método consiste na aplicação de uma sonda no material afim de medir a perda de massa através da variação da área onde está empregada, deste modo a seção transversal do sensor é diminuída ocasionando a variação da resistência do metal, a equação 4 exemplifica este método (NUNES, 2007; WOLYNEC, 2003)

Equação – 4 $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$

R = Resistência (ohm)
 l = Comprimento (cm)
 A = Área da seção transversal (cm²)
 ρ = Resistividade do material (ohm.cm)

O controle de espessura é muito utilizado para controle da corrosão no material puro e revestimento aplicado como na metalização por Zinco, este método como por resistência elétrica tem a desvantagem de não encontrar a corrosão localizada (NUNES, 2007; JAMBO; FÓFANO, 2009). Para o controle da espessura os principais instrumentos de medição são o ultrassom e medidor de espessura como o elcometer conforme a Figura 4.

Figura 4 - Medição de espessura do zinco



Fonte: Autores, (2024)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para realização desse estudo foram retiradas 10 amostras do aço DIN 42CrMo4 de um anel para rolamento de torre eólica conforme Figuras 5 e 6, essas amostras foram retiradas da parte externa superior do anel, conforme a Figura 5. Esta é a região onde é aplicado a metalização por aspersão térmica fonte de estudo desse trabalho. Os cortes dessas amostras foram realizados na máquina de serra fita conforme Figura 7.

Figura 5 - Anel usinado



Fonte: Autores, (2024)

Figura 6 - Amostras cortadas



Fonte: Autores, (2024)

Figura 7 - Máquina de serra fita Franho modelo SFCI320A



Fonte: Autores, (2024)

3.2. Métodos

3.2.1. Processo de metalização

Após o corte executado em serra fita, estas amostras foram submetidas a limpeza com tiner e jateamento com granalha de aço cubica pontiaguda afim de garantir rugosidade entre $0,85$ e $0,90\mu\text{m}$, sendo assim garantindo uma melhor aderência do zinco aspergido às amostras. Das 10 amostras cortadas foram realizadas três diferentes camadas de metalização de zinco em seis amostras sendo $100\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$ e $200\mu\text{m}$, de modo a avaliarmos o tempo de vida útil de cada camada revestida, os processos estão representados nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Metalização das amostras



Fonte: Autores, (2024)

Figura 9 - Medição das amostras



Fonte: Autores, (2024)

3.2.2. Preparo das amostras para o ensaio Potenciodinâmico

Para o ensaio potenciodinâmico, primeiramente as amostras foram cortadas em cortadora metalográfica (Figura 10), as amostras foram adquiridas nas dimensões de 10 mm x 5 mm.

Figura 10 - Cortadora metalográfica modelo CM80



Fonte: Autores, (2024)

As amostras de aço brutas foram lixadas com lixas de 100 até 2000 mesh. Após o lixamento as amostras passaram por higienização em cuba ultrassônica com água destilada por um tempo de 10 minutos e as amostras com tinta foram somente feita a higienização com água.

3.2.3 Célula eletroquímica utilizada, com montagem

As amostras metálicas com e sem tratamento com tinta foram submetidas em célula eletroquímica (Figura 11) para amostra plana em contato com solução salina de 3,5% de NaCl, para a obtenção das curvas de polarização e de potencial de circuito aberto.

Figura 11 - Célula eletroquímica utilizada



Fonte: Autores, (2024).

3.2.4 Ensaio e Software

Para a realização dos ensaios, foi utilizado uma solução aerada de alta condutividade de NaCl 3,5% (p/p) com (pH 6,2), em temperatura ambiente. Todas as amostras permaneceram imersas em solução por aproximadamente 24 horas para a estabilização do potencial e após este período, realizou-se a medida de potencial de circuito aberto no período de 15 minutos. Os ensaios foram realizados no equipamento da marca AUTOLAB, modelo PGSTAT 302N (Figura 12), onde é acoplada a célula eletrolítica descrita acima, para obtenção das curvas de polarização foi utilizado uma varredura de corrente de 0,3 mA acima e abaixo do potencial de circuito aberto. O Software para a compilação e aquisição dos resultados foi a nova versão 2.1.

Figura 12 - Equipamento potenciostato da marca AUTOLAB



Fonte: Autores, (2024).

3.3. Metalografia da amostra bruta

Para fim de conhecer a estrutura de grão do material utilizado foi realizado a metalografia de uma amostra bruta no laboratório de ensaios metalográficos da Fatec de Pindamonhangaba.

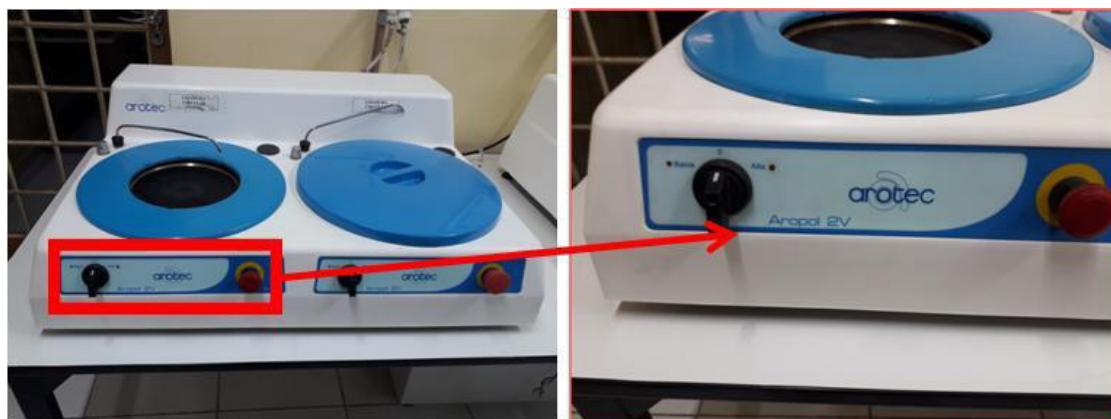
3.3.1 Corte das amostras

Para retirada das amostras, foi utilizada uma máquina cortadora metalográfica CM80 com refrigeração de acordo com imagens da Figura 10, mostrada acima na página 31.

3.3.2 Preparo da amostra para micrografia

Após o corte a amostra foi lixada e polida a partir da lixa 180 até o polimento, realizado com pasta de alumina de $0,3\mu\text{m}$ umedecida em uma manta com água destilada, seguiu se ao ataque químico com Nital 3% e embutimento da amostra para análise da microestrutura, conforme imagens a baixo.

Figura 13 - Lixadeira estacionária



Fonte: Autores, (2024).

Figura 14 - Politriz Fortel



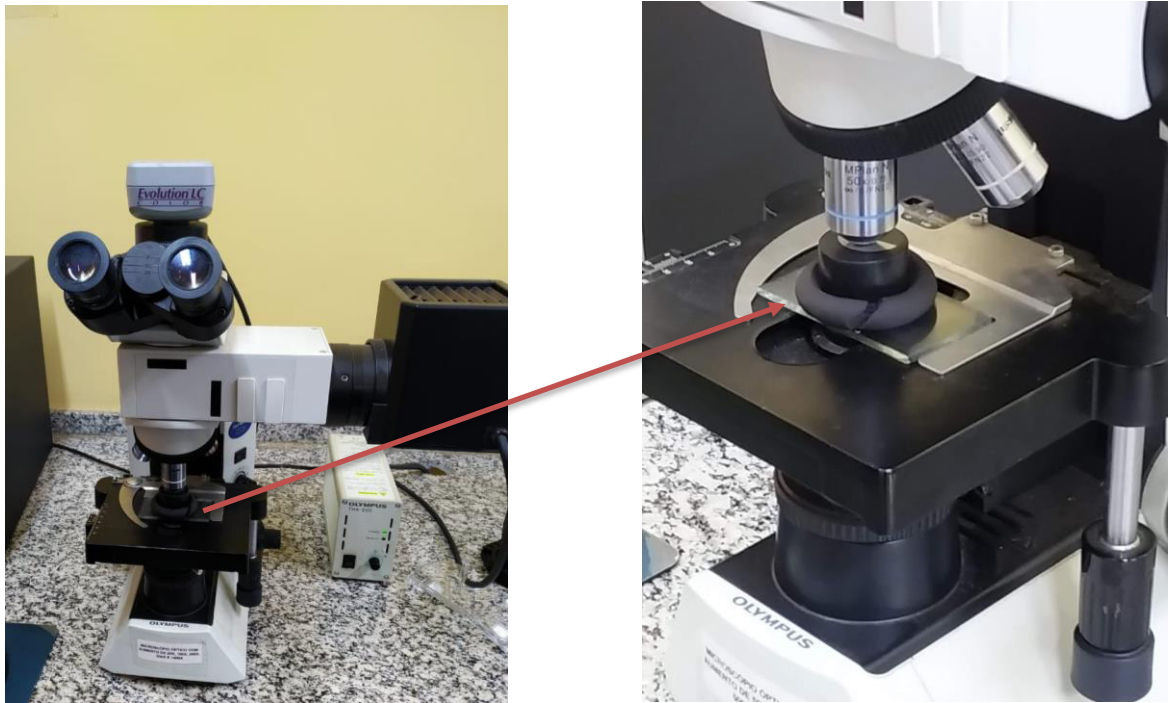
Fonte: Autores, (2024).

Figura 15 - Embutidora AROTEC com amostra embutida



Fonte: Autores, (2024).

Figura 16 - Microscópio Olympus CX31



Fonte: Autores, (2024)

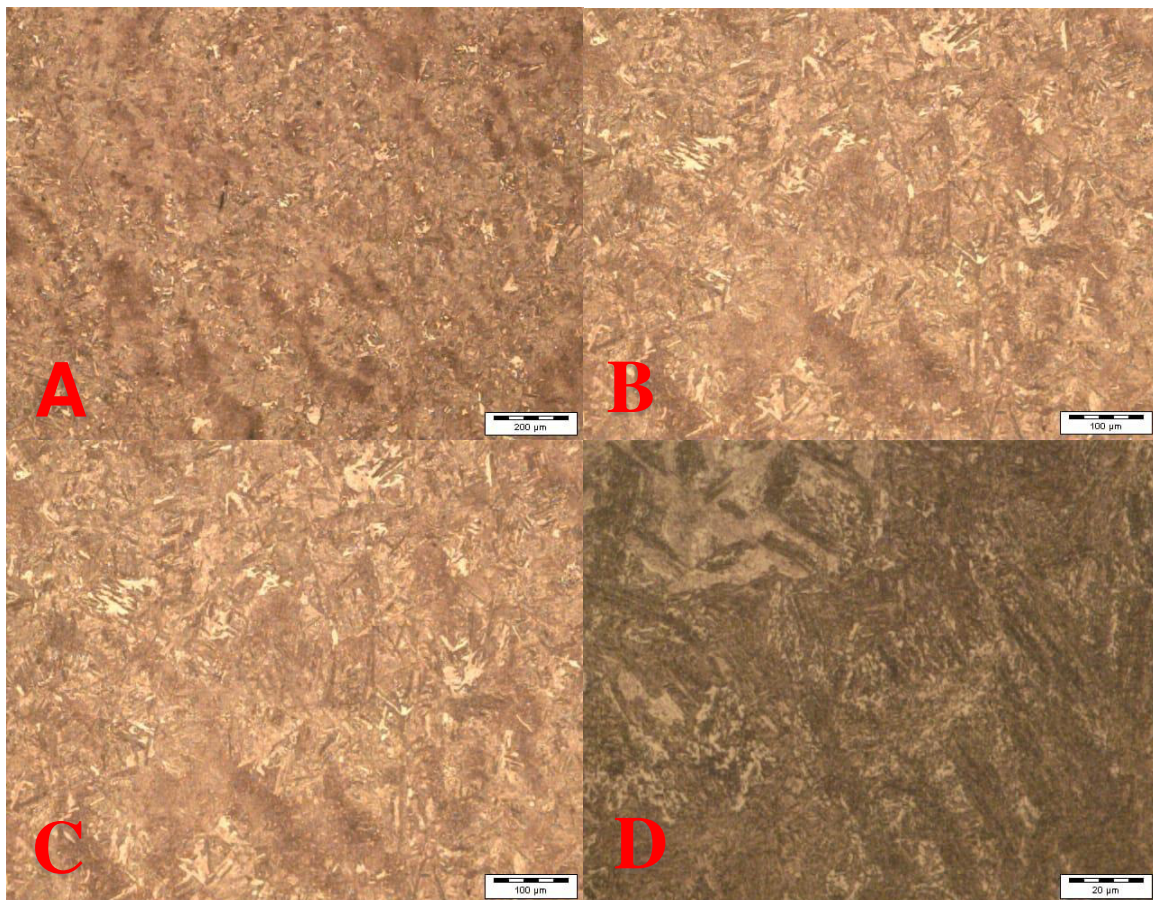
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Microscopia do material bruto

Para fins de informações de fases e assim o comportamento da liga analisada, foram feitas imagens em microscópio com ampliações de 50X **A**, 100X **B**, 500X **C**, 1000X **D** conforme a Figura 17.

Com as análises á micrografia apresentada pode-se observar as fases próximas ao aço de estudo DIN 42CrMo4 que possui matriz martensita revenida em sua estrutura de grãos, conforme descrita na literatura e norma DIN EN83100-3.

Figura -17 Estrutura de grãos do aço DIN 42CrMo4



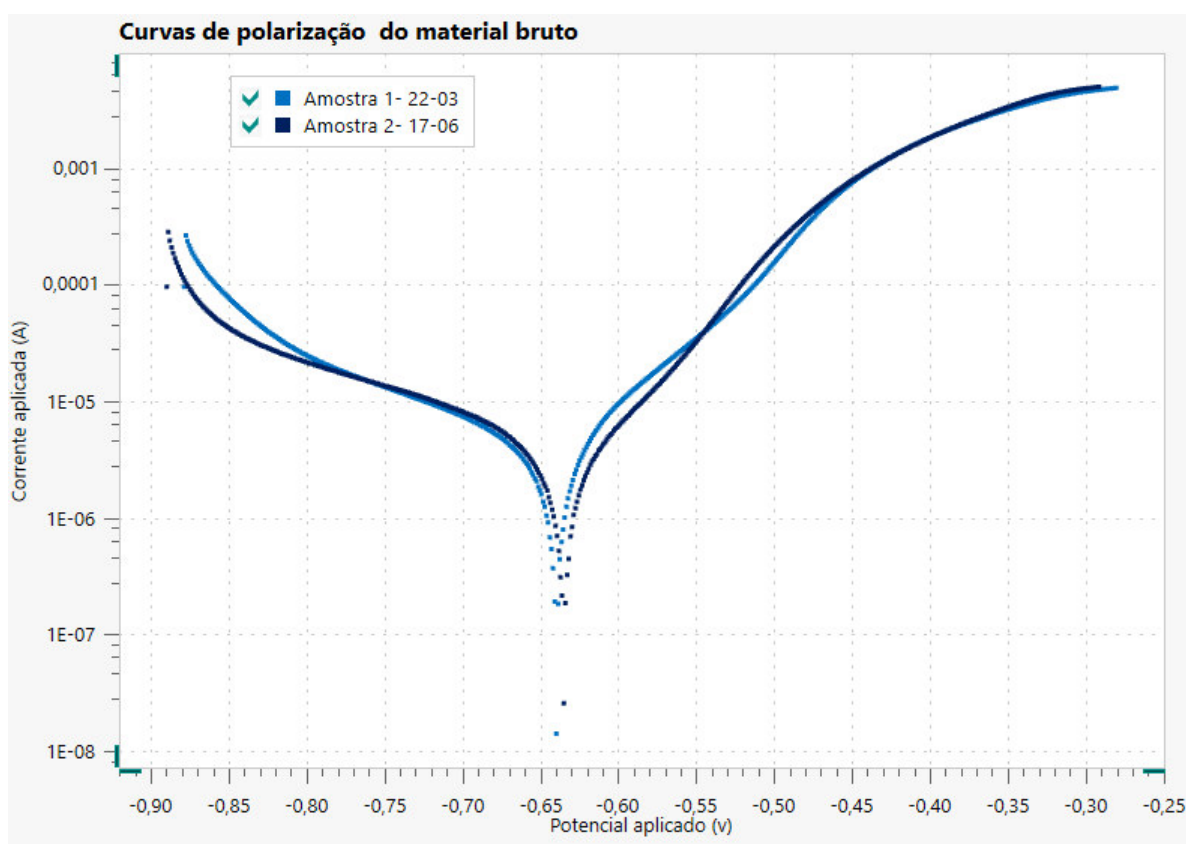
Fonte: Autores, (2024).

4.2 Análise do ensaio potenciodinâmico

4.2.1 Material Bruto

Com a aplicação de corrente e medição de potencial no sistema montado de célula eletroquímica, pode-se gerar as curvas de polarização (CP). Estas curvas obtidas são ilustradas pela Figura 18.

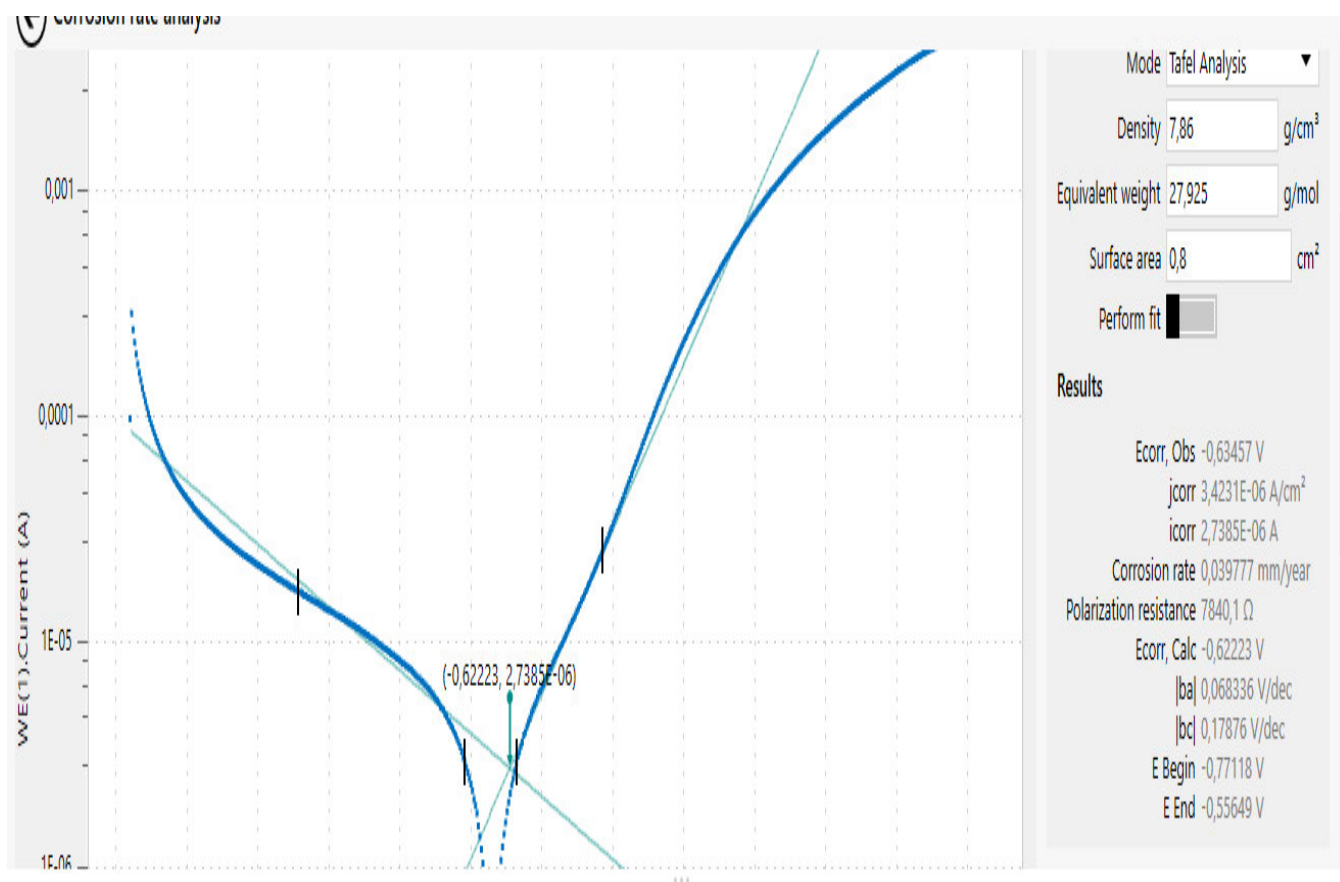
Figura 18 - Curvas de polarização da amostra bruta sem revestimento



Fonte: Autores, (2024).

Em geral, potenciais mais positivos indicam comportamento mais nobre, em relação a corrente, quanto maior valor maior a taxa de corrosão e consequentemente menor a resistência a corrosão. Com os valores de potencial e densidade de corrente foram obtidas pela lei de Tafel as taxas de corrosão para o aço bruto como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Resultado de Análise por Tafel para a amostra bruta



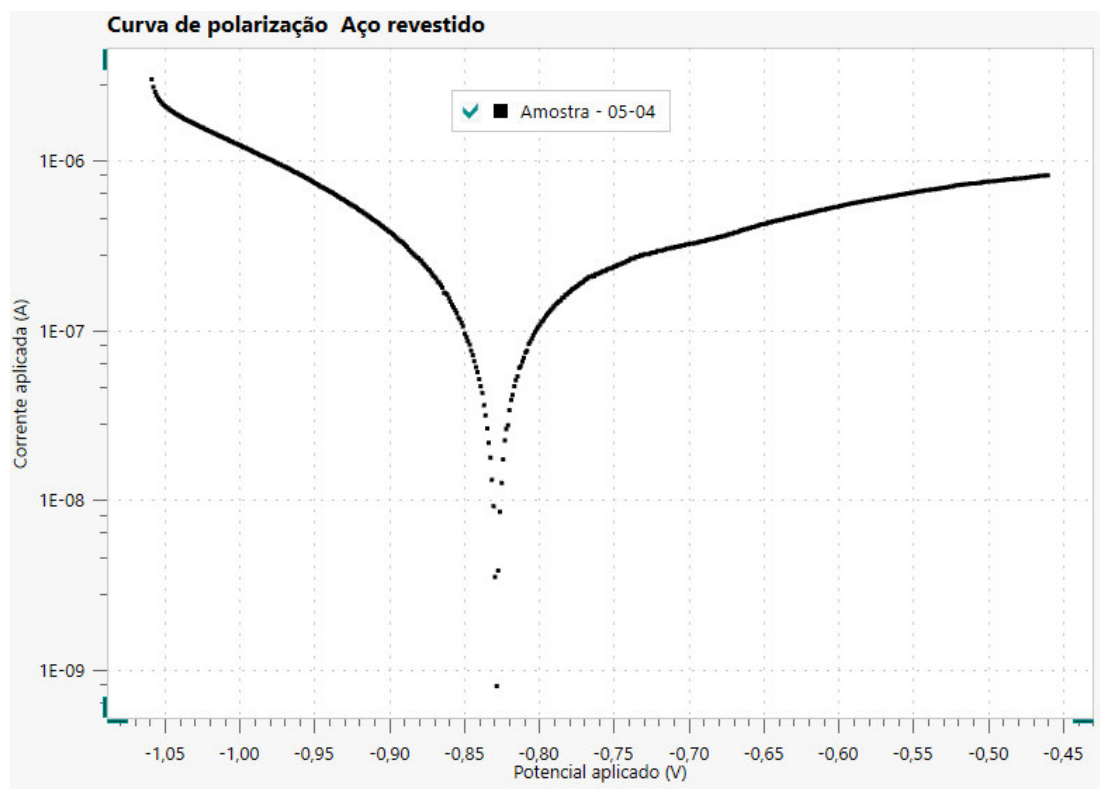
Fonte: Autores, (2024)

A amostra do material bruto apresentou potencial de corrosão de -0,59 V, próximo ao potencial padrão do Ferro na literatura (GENTIL, 2011). Por outro lado, a taxa de corrosão calculada pelo Software foi de aproximadamente 0,04 mm/ano.

4.2.2. Material revestido

Como no material bruto também foi realizado o ensaio potenciodinâmico para determinação do potencial de corrosão e taxa de corrosão, ilustrados nas Figuras 20 e 21.

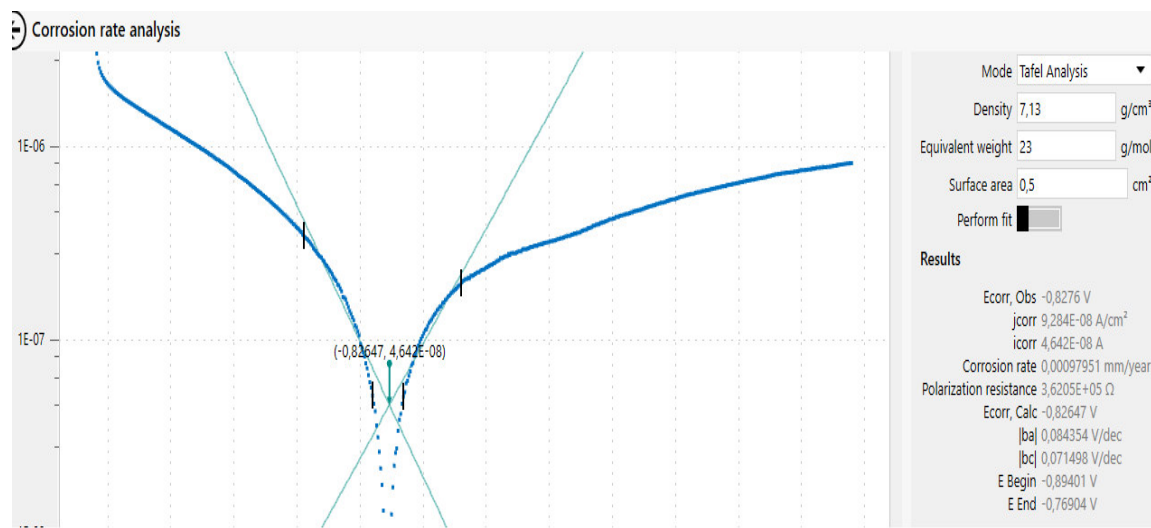
Figura 20 - Curva de polarização do aço revestido



Fonte: Autores, (2024).

De acordo com a Figura 21 o potencial de corrosão foi em torno de -0,76V, muito próximo do valor da literatura para o Zinco, em que é esperado devido ao tratamento realizado que foi a metalização com Zinco. Para determinação da taxa de corrosão e consequentemente a resistência á corrosão do material foi aplicada a lei de Tafel como ilustrado na Figura 24.

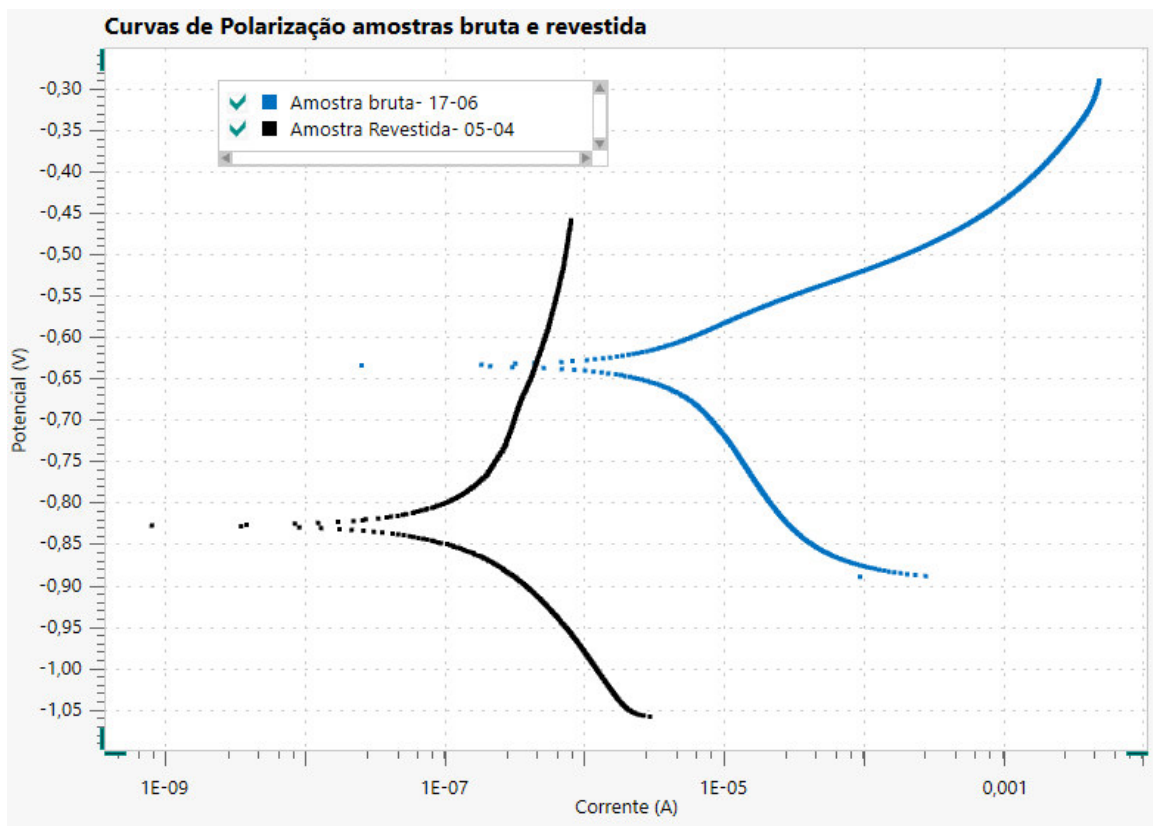
Figura 21 - Análise de Tafel para a amostra com revestimento 150-200



Fonte: Autores, (2024).

Comparando-se os resultados de taxa de corrosão houve uma diminuição de cerca de 40 vezes da velocidade de corrosão com a utilização do revestimento 150-200 em relação ao material bruto no meio salino estudado, que se relaciona com o aumento da vida útil do material. Sendo que para o cálculo de vida útil do material deve-se considerar a medida da espessura do revestimento e a espessura mínima da espessura da peça do material em serviço. A Figura 22 demonstra os comparativos dos dados obtidos de potencial e corrente mostrando a coerência da obtenção dos resultados em relação ao meio estudado (salino 3,6% NaCl).

Figura 22 - Cuervas de polarização de amostra bruta e revestida



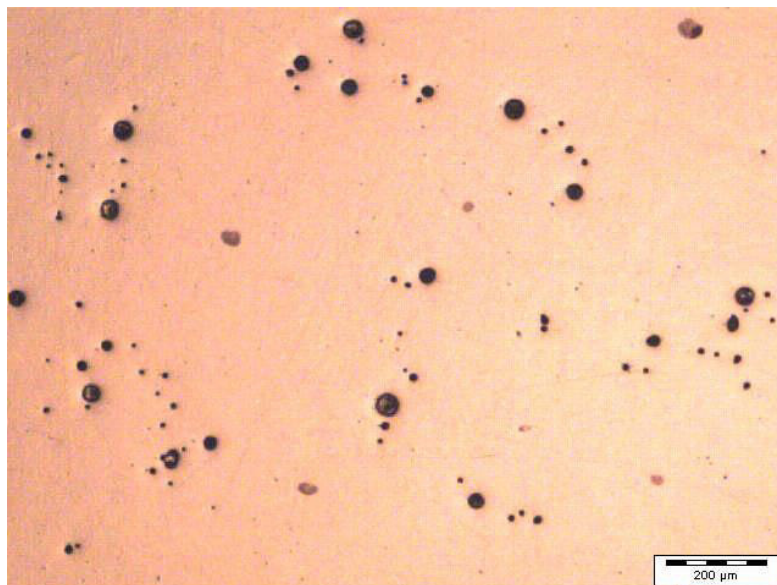
Fonte: Autores, 2024.

Como observado na Figura 22, a amostra revestida apresenta uma resistência a corrosão maior que a amostra bruta, de acordo com os valores de corrente. Adicionalmente pode-se perceber um aumento de região passiva que o revestimento proporcionou ao aço.

4.2.3 Macrografia do teste de corrosão da amostra bruta

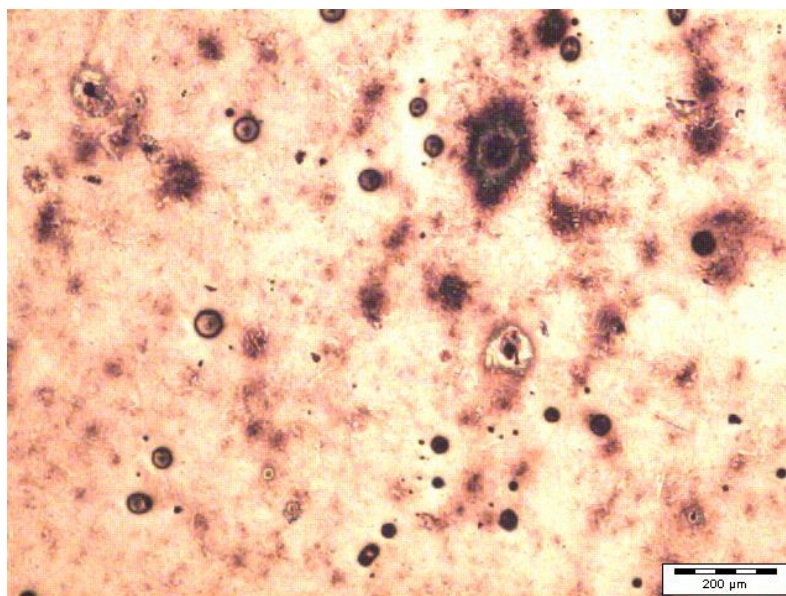
Para fim de conhecimento da resistência a corrosão foram realizados os testes de corrosão da amostra bruta e amostras revestidas de 100-150 μ m e 150-200 μ m, como o material de estudo é a base de cromo as imagens definem as características de corrosão conforme a literatura, ficou claro segundo a Figura 23 e 24 que a corrosão inicia pela formação por pites.

Figura 23 - Amostra bruta, ampliação de 50X antes do ensaio de corrosão



Fonte: Os Autores, (2024)

Figura 24 - Amostra bruta, ampliação de 50X após o ensaio de corrosão



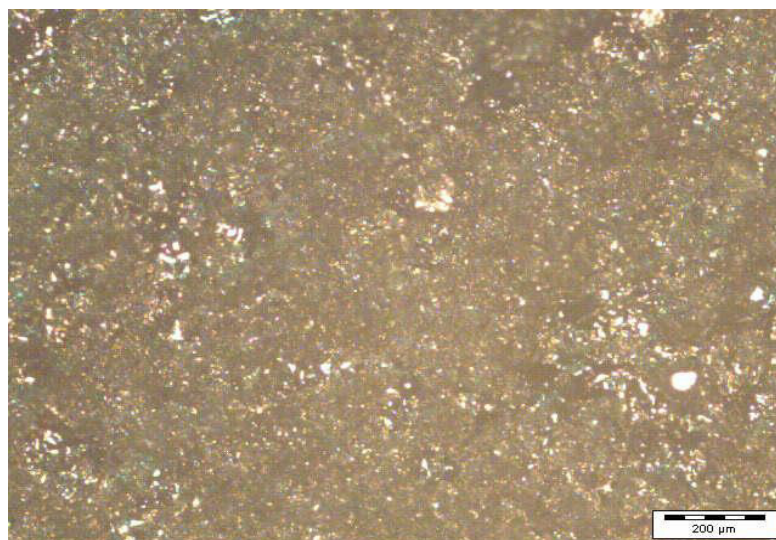
Fonte: Os Autores, (2024).

4.2.4 Macrografia do teste de corrosão das amostras revestidas

Nesta seção constam as imagens da amostra revestida a 150 e 200μm antes e depois da corrosão, foi realizada a micrografia somente da amostra de maior espessura uma vez que a micrografia do revestimento é semelhante. As imagens conforme figura 19 passaram pelo processo de metalização por Zinco a uma

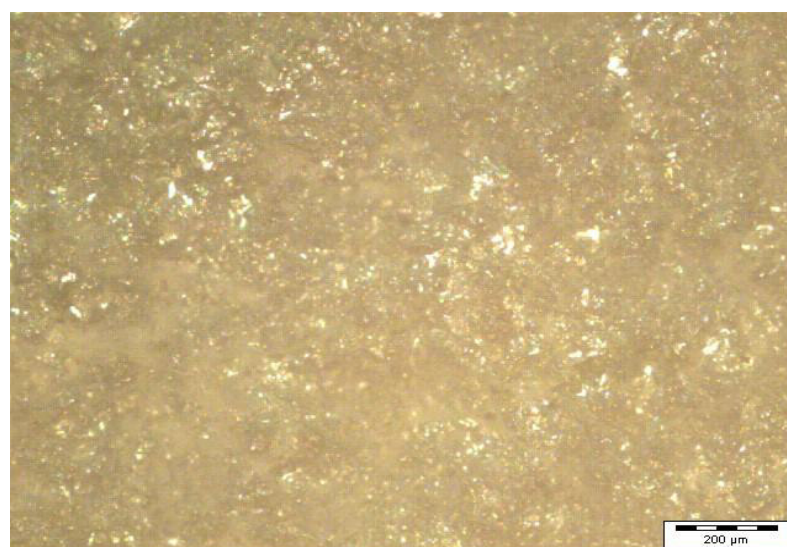
espessura de 150 a 200 μ m, as duas imagens foram ampliadas no telescópio Olympus CX31 a 50X e 100X, (Explicação das imagens)

Figura 25 - Macrografia das amostras revestidas antes do ensaio de corrosão



Fonte: Autores, (2024)

Figura 26 - - Macrografia das amostras revestidas após o ensaio de corrosão



Fonte: Autores, (2024)

5 Conclusões

Com a utilização dos revestimentos de zinco houve diminuição da nobreza do material o que é esperado, pois na literatura ligas de zinco apresentam potenciais mais baixos em relação ao aço. No caso de resistência a corrosão o revestimento 150-200µm proporcionou ao aço DIN 42CrMo4 uma resistência a corrosão na ordem de 40 vezes maior ao que o aço bruto proporciona, dessa forma fica claro que o revestimento de metalização por Zinco cumpre com a função de proteção catódica ao rolamento de torre eólica.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, William D; RETHWISCH, David G. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. Rio de Janeiro. 2017.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica – Processo de Fabricação e Tratamento**. Vol. 1, 2ª Ed. - São Paulo: Editora Mc Graw Hill LTDA, 1986.

DIN EN 10083-3. **Steel for machine and equipamento construction – part 3 high-strength and wear-resistant steels, 2006-01**.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GIRÃO, Izabela Ferreira. **CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO POR PITE DO AÇO UNS S31803 APÓS SOLDAGEM**. 2008. 50 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos – CDMATM - Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo - SP, 2008.

https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2014/INTERCORR2014_149.pdf

<https://repositorio.ufersa.edu.br/items/ed2da226-a2aa-421d-87d7-b15a5c4f12ea>

<https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/34e19c83-bddf-4f99-a487-0341ba9d4ef6/content>

<https://repositorio.ufersa.edu.br/items/ed2da226-a2aa-421d-87d7-b15a5c4f12ea>

LIMA, Carlos Camello; TREVISAN, Roseana. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações: Metalização, Revestimentos Cerâmicos, Revestimentos Poliméricos, Revestimentos Compósitos**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2007.

NUNES, Laerce de Paula. **Fundamentos de Resistência à Corrosão**. Rio de Janeiro: Interciencia, 2007.

PRADO, P. S. C.; CARDOSO, W. A. H. **Avaliação da corrosão do aço SAE 4340, submetido à tempera**. 2013. 93p. Trabalho de Graduação (Curso de Mecânica Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2013.

RAMOS JÚNIOR, Moacir. **Apostila Fundamentos de Corrosão e Degradação de Materiais em Equipamentos de Processo**. 1ª ed. 2004. 103p.