

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
CEARÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**CAMILA ALVES DE LAVOR**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E CORROSIVAS EM  
UM ELEMENTO DE FIXAÇÃO UTILIZADO EM TURBINAS EÓLICAS**

**MARACANAÚ, CEARÁ**

**2024**

CAMILA ALVES DE LAVOR

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E CORROSIVAS EM UM  
ELEMENTO DE FIXAÇÃO UTILIZADO EM TURBINAS EÓLICAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Energias Renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Prof. Dr. Marcelo Monteiro Valente Parente

MARACANAÚ, CEARÁ

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Instituto Federal do Ceará - IFCE  
Sistema de Bibliotecas - SIBI  
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L414a    Lavor, Camila.  
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E CORROSIVAS EM UM ELEMENTO DE  
FIXAÇÃO UTILIZADO EM TURBINAS EÓLICAS / Camila Lavor. - 2024.  
65 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis, Campus  
Maracanaú, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Marcelo Monteiro Valente Parente.  
Coorientação: Prof. Dr. Francisco José dos Santos Oliveira.
1. Energia Eólica. 2. Aço Médio Carbono. 3. Tratamento Térmico. 4. Propriedades Mecânicas. 5.  
Corrosão. I. Título.

CDD 620.91

---

CAMILA ALVES DE LAVÔR

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E CORROSIVAS EM  
ELEMENTO DE FIXAÇÃO UTILIZADO EM TURBINAS EÓLICAS

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 19/06/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Monteiro Valente Parente (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Francisco José dos Santos Oliveira  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

*Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o meu aprendizado.*

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo.

Agradeço de coração aos meus pais, Francisca e Cássio, por todo amor, cuidado e apoio incondicional em todas as etapas da minha vida. Sua presença constante e encorajamento foram fundamentais para minha trajetória acadêmica e pessoal.

Ao meu orientador, Marcelo Parente, expresso minha profunda gratidão pela orientação, paciência e incentivo ao longo de todo o processo. Sua expertise, conselhos valiosos e apoio constante foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e colegas do Instituto Federal do Ceará, campus Maracanaú, agradeço pela troca de conhecimentos, discussões enriquecedoras e por terem tornado esta jornada acadêmica mais leve e prazerosa. Em especial, agradeço ao professor Francisco José dos Santos Oliveira por aceitar fazer parte da banca examinadora e pelas importantes contribuições.

Ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), expresso minha gratidão pelos recursos e infraestrutura fornecidos, que foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Aos meus grandes amigos João Mendonça e Daniel de Alencar, agradeço pela amizade constante e pelo inestimável apoio durante esta etapa.

Ao Laboratório de Inspeção e Análise de Falha, agradeço pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho. Em especial, ao professor Venceslau, agradeço pela ajuda e troca de conhecimento.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigado.

# Resumo

Nos últimos anos a humanidade vem se conscientizando sobre os impactos que o meio-ambiente tem sofrido devido ao seu mau e excessivo uso. Nesse contexto, tem-se intensificada a busca de fontes alternativas de geração de energia, em especial as fontes renováveis, onde destacamos a energia eólica. Com a evolução do setor de energia eólica, o aumento das dimensões dos aerogeradores, a indústria se depara com defeitos em componentes essenciais, resultando no incremento dos gastos associados à operação e à manutenção (O&M). Uma das falhas mais recorrentes que ocorrem nesse setor são as falhas em parafusos, principalmente os que são utilizados na conexão entre cubo (hub) e pás. Nesse contexto, esse trabalho investigou as propriedades mecânicas e corrosivas de um parafuso prisioneiro empregue nessa aplicação, sendo relatadas falhas e rupturas causadas por fadiga. Para isto, foi identificada a microestrutura do componente e foi realizado um tratamento térmico de têmpera e revenimento, avaliando as propriedades mecânicas e corrosivas do material antes e após esse tratamento, propondo melhoria a empresa que possui a problemática da fratura com seu elemento de fixação. A microestrutura do material é constituída de ferrita com uma granulação muito pequena e levemente alongada. É possível que também exista perlita, algo característico de um aço hipoeutetóide. Após o processo dos tratamentos de têmpera e revenimento, foi possível observar a presença de uma estrutura martensítica com morfologia de ripas. Com relação às propriedades mecânicas, após o tratamento térmico, o aço apresentou um valor de 1400 MPa, 463 HV e 37,9 J, para o Limite de Resistência a Tração, Microdureza e Energia absorvida para Fratura, respectivamente. Esses valores representam um aumento de 33% no valor de LRT, de 25% no valor de Microdureza Vickers e uma diminuição de 29% na Energia absorvida quando comparada com a condição inicial. Com relação aos ensaios eletroquímicos, pelo ensaio de Polarização Potenciodinâmica Cíclica (PPC), foi possível observar que a passivação da camada não foi efetiva em ambas as condições de estudo, uma vez que a densidade de corrente na região de passivação é elevada e apresenta variação de acordo com o valor de potencial aplicado. Assim, analisando os resultados obtidos no ensaio de PPC, é verificado que a aplicação dos ensaios térmicos de têmpera e revenimento não resultou em um aumento da reatividade química do material, obtendo resultados eletroquímicos semelhantes. No ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), as amostras submetidas às diferentes condições de estudo apresentaram variações nas respostas obtidas. No entanto, a análise detalhada dos dados revelou que essas variações possuem valores pouco expressivos. Essa insignificância estatística nas diferenças observadas sugere que as condições avaliadas não têm impacto relevante sobre os parâmetros de corrosão medidos. Conseqüentemente,

as amostras podem ser consideradas equivalentes em termos de comportamento frente à corrosão, quando expostas às condições experimentais estabelecidas. Este resultado indica que, apesar das variações ambientais ou de outros fatores operacionais testados, a resistência à corrosão dos parafusos de torres eólicas permanece estável, evidenciando a robustez do material utilizado nas situações analisadas.

**Palavras-chaves:** Energia Eólica; Aço Médio Carbono; Tratamento Térmico; Propriedades Mecânicas; Corrosão.

# Abstract

In recent years, there has been a growing awareness of the adverse environmental impacts caused by the misuse and over-exploitation of natural resources. Within this context, the search for alternative energy sources has intensified, particularly for renewable energy sources, with wind energy emerging as a prominent solution. As the wind energy sector evolves and wind turbine dimensions increase, the industry faces challenges with failures in critical components, leading to a rise in operational and maintenance (O&M) costs. One of the most recurrent failures in this sector involves bolts, especially those used in the connection between the hub and blades. This study investigates the mechanical and corrosive properties of a stud bolt used in this application, focusing on failures and fractures caused by fatigue. The microstructure of the component was characterized, and heat treatment processes such as quenching and tempering were applied to evaluate the mechanical and corrosive properties of the material before and after treatment. The study proposes improvements to a company facing fracture issues with its fastening elements. The microstructure of the material consists of ferrite with a very fine and slightly elongated grain, with the possible presence of pearlite, a characteristic feature of a hypoeutectoid steel. After the quenching and tempering treatments, a lath martensitic structure was observed. Regarding the mechanical properties, post-heat treatment, the steel exhibited values of 1400 MPa, 463 HV, and 37.9 J for Tensile Strength, Vickers Microhardness, and Fracture Energy, respectively. These results represent a 33% increase in Tensile Strength, a 25% increase in Vickers Microhardness, and a 29% decrease in Fracture Energy compared to the initial condition. Concerning the electrochemical tests, the Cyclic Potentiodynamic Polarization (CPP) test revealed that the passivation layer was ineffective under both conditions studied, as the current density in the passivation region was high and varied according to the applied potential. Analyzing the CPP test results, it was found that the application of quenching and tempering did not result in increased chemical reactivity of the material, yielding similar electrochemical results. In the Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) test, the samples subjected to different study conditions showed variations in the obtained responses. However, a detailed data analysis revealed that these variations were not statistically significant. This statistical insignificance in the observed differences suggests that the evaluated conditions did not have a relevant impact on the measured corrosion parameters. Consequently, the samples can be considered equivalent in terms of corrosion behavior under the established experimental conditions. This finding indicates that, despite environmental variations or other tested operational factors, the corrosion resistance of wind turbine bolts remains stable, demonstrating the robustness of the material used under the analyzed conditions.

**Key-words:** Wind Energy; Medium Carbon Steel; Heat Treatment; Mechanical Properties; Corrosion.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Taxa de falha por tamanho da turbina. . . . .	12
Figura 2 – Acidente com a nacele do aerogerador em Taikoyama. . . . .	13
Figura 3 – Raiz de inserção e fixadores de pá eólica. . . . .	13
Figura 4 – Princípio de funcionamento de uma turbina eólica. . . . .	16
Figura 5 – Componentes do Rotor. . . . .	18
Figura 6 – Componentes da Pá Eólica. . . . .	18
Figura 7 – Conjuntos de parafusos para união das pás ao Hub. . . . .	19
Figura 8 – Cubo (Hub) do Aerogerador. . . . .	19
Figura 9 – Representação das forças que atuam sobre uma junta aparafusada. . .	20
Figura 10 – Curva Tempo-Temperatura-Transformação Aço AISI 4140. . . . .	23
Figura 11 – Curva Tensão x Deformação. . . . .	26
Figura 12 – Tipos de ensaios de dureza. . . . .	28
Figura 13 – Máquina de impacto Charpy. . . . .	29
Figura 14 – Principais formas de corrosão observadas em materiais metálicos. . . .	30
Figura 15 – Esquema para medição do potencial de corrosão. . . . .	31
Figura 16 – Curva de polarização típica obtida por meio da técnica potenciocinética ou potenciodinâmica para a determinação do $E_p$ . . . . .	32
Figura 17 – Curvas representativas da polarização potenciodinâmica cíclica de duas ligas, determinadas a 25 °C em solução aquosa 3,56% NaCl (ASTM G61, 1993). . . . .	33
Figura 18 – Esquema de curva de polarização cíclica de um aço inoxidável em solução contendo íons cloretos. . . . .	34
Figura 19 – Representação esquemática do diagrama de Nyquist. . . . .	35
Figura 20 – Parafuso utilizado no estudo. . . . .	37
Figura 21 – Amostra indicando o processo de falha no parafuso. . . . .	37
Figura 22 – Fluxograma do procedimento experimental apresentando etapas segui- das e técnicas utilizadas neste trabalho. . . . .	39
Figura 23 – Espectrômetro de Emissão Óptica utilizado neste trabalho. . . . .	40
Figura 24 – Forno EDG utilizado no tratamento térmico. . . . .	40
Figura 25 – Microdurômetro utilizado neste trabalho. . . . .	42
Figura 26 – Máquina de tração EMIC. . . . .	42
Figura 27 – Corpos de Prova Ensaio Tração. . . . .	43
Figura 28 – Corpos de Prova Ensaio Tração Tratados Termicamente. . . . .	43
Figura 29 – Máquina de ensaio Charpy. . . . .	44
Figura 30 – Desenho esquemático dos corpos de prova para os ensaios de impacto. .	44
Figura 31 – Corpos de Prova Ensaio Charpy das amostras não tratadas. . . . .	45

Figura 32 – Corpos de Prova Ensaio Charpy das amostras tratadas termicamente. . . . .	45
Figura 33 – Célula Eletroquímica. . . . .	46
Figura 34 – Bancada de testes para os ensaios eletroquímicos: Autolab PGSTAT 128N. . . . .	47
Figura 35 – Metalografia do Corpo de prova do material como recebido (500x). . . . .	49
Figura 36 – Metalografia do Corpo de prova do material como recebido (1000x). . . . .	50
Figura 37 – Metalografia do Corpo de prova do material temperado e revenido (500x). . . . .	50
Figura 38 – Metalografia do Corpo de prova do material temperado e revenido (1000x). . . . .	51
Figura 39 – Gráfico Tensão x Deformação das amostras como recebidas. . . . .	52
Figura 40 – Gráfico Tensão x Deformação das amostras temperadas e revenidas. . . . .	52
Figura 41 – Superfície de fratura da amostra não tratada, com predominância de dimples. . . . .	54
Figura 42 – Superfície de fratura da amostra não tratada, com presença de facetas de clivagem. . . . .	54
Figura 43 – Superfície de fratura da amostra não tratada. . . . .	55
Figura 44 – Superfície de fratura da amostra tratada termicamente. . . . .	55
Figura 45 – Superfície de fratura da amostra tratada termicamente, indicando a presença das facetas de clivagem. . . . .	55
Figura 46 – Superfície de fratura da amostra tratada termicamente com a ampliação de 6907x. . . . .	56
Figura 47 – Gráficos dos ensaios de OCP para a liga estudada em solução de NaCl 0,1 mol/L a temperatura ambiente na condição (a) como recebida e (b) tratada termicamente. . . . .	56
Figura 48 – MO (50x) da liga, na condição como recebida, antes do ensaio de PPC. . . . .	57
Figura 49 – MO (50x) da liga, na condição tratada termicamente, antes do ensaio de PPC . . . . .	57
Figura 50 – Gráfico de polarização da liga nas condições como recebida e tratada termicamente . . . . .	58
Figura 51 – MO (50x) da liga, na condição como recebida, depois do ensaio de PPC . . . . .	59
Figura 52 – MO (50x) da liga, na condição tratada termicamente, depois do ensaio de PPC . . . . .	59
Figura 53 – Diagramas de Nyquist das amostras como recebida e tratada termica- mente após imersão durante 1800s na solução de 3,5% NaCl a tempera- tura ambiente . . . . .	60

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Composição Química do aço AISI 4140. . . . .	22
Tabela 2 – Composição química da liga (% em massa). . . . .	38
Tabela 3 – Análise estatística para a dureza do material como recebido. . . . .	51
Tabela 4 – Análise estatística para a dureza do material tratado termicamente. . .	52
Tabela 5 – Energia absorvida média. . . . .	53

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Objetivos	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Turbinas eólicas</b>	<b>16</b>
2.1.1	Componentes dos aerogeradores	16
2.1.1.1	Rotor	17
2.1.1.2	Unões parafusadas	20
<b>2.2</b>	<b>Aços aplicados na produção de parafusos</b>	<b>21</b>
2.2.0.1	Aço 4140	21
<b>2.3</b>	<b>Tratamentos térmicos aplicados em parafusos</b>	<b>22</b>
2.3.1	Têmpera	23
2.3.2	Revenimento	24
<b>2.4</b>	<b>Propriedades mecânicas de parafusos</b>	<b>25</b>
2.4.1	Ensaio mecânicos aplicados em parafusos	26
2.4.1.1	Ensaio de tração	26
2.4.1.2	Ensaio de dureza	27
2.4.1.3	Ensaio de Charpy	29
<b>2.5</b>	<b>Corrosão em parafusos</b>	<b>29</b>
2.5.1	Ensaio de corrosão	30
2.5.1.1	Potencial de Circuito Aberto (OCP)	31
2.5.1.2	Técnica Potenciocinética ou Potenciodinâmica	31
2.5.1.3	Polarização Potenciodinâmica Cíclica (PPC)	32
2.5.1.4	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)	34
2.5.1.4.1	Diagrama de Nyquist	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>37</b>
3.1.1	Análise da composição química	38
<b>3.2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>38</b>
3.2.1	Análise de Composição Química por Espectrometria de Emissão Óptica (OES)	39
3.2.2	Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento	40
3.2.3	Caracterização da Microestrutura	41
3.2.3.1	Preparação das amostras	41
3.2.3.2	Microscopia Ótica	41

3.2.3.3	Microdureza . . . . .	41
3.2.4	Ensaio Mecânicos . . . . .	42
3.2.4.1	Ensaio de Tração . . . . .	42
3.2.4.2	Ensaio de Impacto Charpy-V . . . . .	43
3.2.5	Ensaio Eletroquímicos de corrosão . . . . .	45
3.2.5.1	Potencial de Circuito Aberto . . . . .	46
3.2.5.2	Polarização Potenciodinâmica Cíclica . . . . .	47
3.2.5.3	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) . . . . .	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização microestrutural . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio Mecânicos . . . . .</b>	<b>51</b>
4.2.1	Ensaio de microdureza Vickers . . . . .	51
4.2.2	Ensaio de Tração . . . . .	52
4.2.3	Ensaio de Impacto Charpy . . . . .	53
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de Corrosão . . . . .</b>	<b>56</b>
4.3.1	Potencial de Circuito Aberto (OCP) . . . . .	56
4.3.2	Polarização Potenciodinâmica Cíclica (PPC) . . . . .	57
4.3.2.1	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) . . . . .	59
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>62</b>

# 1 Introdução

A transição energética é um tema que ganha cada vez mais destaque na indústria brasileira. Substituir fontes fósseis por outros tipos de energia demanda tempo, persistência e vontade política. Os investimentos em energias renováveis estão aumentando significativamente, acompanhados de apoio político e incentivos fiscais, como linhas de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e isenções temporárias de impostos de importação. Com a grande chegada da nova matriz energética, o hidrogênio verde, o Governo tem gerado cada vez mais incentivos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) no Brasil (Wills; Westin, 2018).

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA), o investimento anual em energia renovável aumentou quase 25% desde 2021, em comparação com um aumento de 15% nos combustíveis fósseis. Em 2019 o uso de energia eólica cresceu 15,5% (RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA, 2019). De acordo com o relatório do Conselho Global de Energia Eólica (GWEC), é previsto que, no intervalo entre 2023 e 2027, sejam incorporados 26,5 GW de capacidade de geração de energia eólica onshore, com o Brasil desempenhando um papel significativo, contribuindo com 60% desse total, o que equivale a 16 GW, fortalecendo ainda mais sua posição como líder regional.

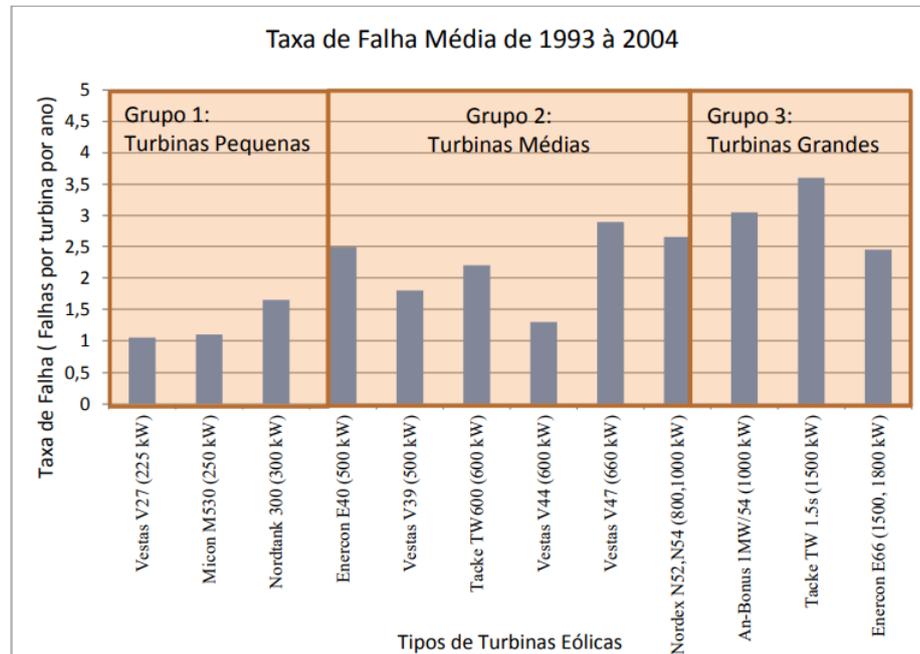
Com a alta demanda por energias renováveis e a grande necessidade de maior potência, as turbinas eólicas estão se tornando cada vez maiores e sendo instaladas em locais offshore, devido à melhor qualidade dos ventos, menor interferência do relevo e das edificações, e à disponibilidade de muitas áreas no mar territorial, entre outros fatores. Conforme as dimensões das turbinas aumentam, a energia eólica em alto-mar, de acordo com Segen Estefen, professor da UFRJ, evoluiu para ser o próximo passo natural no desenvolvimento dessa tecnologia.

Com a evolução do setor de energia eólica e o aumento das dimensões dos aerogeradores, a indústria se depara com defeitos em componentes essenciais, resultando no incremento dos gastos associados à operação e manutenção (O&M). Conforme apresentado na Figura 1, as informações das turbinas indicam que, quanto maior o porte, maior é a taxa de falhas, tornando necessária uma frequência maior de manutenção, como mencionado no estudo de Márquez et al. (2012).

O Brasil possui ventos fortes, constantes, quentes e úmidos, as turbinas, por sua vez, aumentam quase que o dobro em número de rotações a cada ano, resultando em uma maior demanda e uma produção significativamente superior de energia em comparação com máquinas instaladas na Europa. Isso se traduz em uma maior produção de energia em um período de tempo mais curto, tornando-as muito mais suscetíveis ao desgaste de

seus componentes tanto internos quanto externos (INDUSTRIA, 2023).

Figura 1 – Taxa de falha por tamanho da turbina.



Extraída de Márquez et al. (2012)

O especialista e ex-CEO da fabricante de pás eólicas TECSIS, Bento Koike, formado em Engenharia Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica, e o professor do FRAUHOFFER INSTITUT da Alemanha, Andreas Reuter, compartilham em uma entrevista suas perspectivas sobre o assunto. Eles afirmam que "os ventos no Brasil apresentam condições muito particulares e especiais, distintas de outras partes do mundo, sendo notavelmente intensos e estáveis".

Quando se trata do projeto de turbinas eólicas, a avaliação de fadiga é um parâmetro de extrema importância a ser levado em conta. Isso se deve ao fato de que as turbinas eólicas devem ser concebidas para operar por um período mínimo de 20 anos, conforme destacado por Hansen (2008).

Um exemplo de falha por fadiga em uma turbina eólica aconteceu em março de 2013, apresentado na Figura 2, quando uma das naceles de um aerogerador, situado no parque eólico de Taikoyama, no Japão, sofreu um colapso após 12 anos de operação. Essa falha foi atribuída à fadiga nos parafusos de alta tensão, conforme apontado por Liu (2016).

Os parafusos utilizados na conexão entre cubo (hub) e pás estão representados na Figura 3. Trata-se de parafusos temperados usando tratamentos térmicos de têmpera e revenimento para que possam ter uma maior dureza, reduzir tenacidade e que o material possa ter uma maior resistência mecânica. As pás das turbinas eólicas são anexadas à

estrutura frontal do aerogerador, chamada de cubo, através de flanges, essa estrutura é geralmente fabricada em aço ou uma liga de alta resistência.

Figura 2 – Acidente com a nacele do aerogerador em Taikoyama.



Extraída de Liu (2016)

Figura 3 – Raiz de inserção e fixadores de pá eólica.



Extraída de Filho (2017)

De acordo com Lee e Park (2015), relatórios de manutenção indicam que falhas por fadiga de parafusos estão entre as causas mais frequentes em turbinas eólicas, como colapso da torre ou desprendimento das pás eólicas. Ainda de acordo com Lee e Park (2015), o número de falhas nesses equipamentos dobrou nos últimos 10 anos. Na Dinamarca, cerca de 100 incidentes de falha relacionados à segurança foram registrados durante o período de 2010 a 2015, dos quais mais de um terço foram classificados como falhas totais de turbinas eólicas (Shakeri *et al.*, 2022).

A Resistência à fadiga de um parafuso depende de muitos fatores, que incluem material, passo da rosca, tamanho do parafuso, nível de carga aplicada, bem como processos

de fabricação, como sua composição e tratamentos térmicos submetidos. As características mecânicas dos aços são diretamente influenciadas pelas alterações microestruturais que surgem durante os processos de tratamento térmico, essas mudanças ocorrem como resultado das condições de tempo e temperatura durante etapas como têmpera e revenimento e entre outras.

Com o intuito de estudar o comportamento desse importante elemento para os aerogeradores, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos na literatura. Dentre eles, vale destacar o trabalho de Shakeri et al. (2022), que tem como objetivo investigar o efeito de defeitos de fabricação induzidos pela laminação de roscas na vida em fadiga de alto ciclo de pinos roscados M30 classe 10.9. Testes de fadiga de alto ciclo de dois lotes de parafusos nominalmente idênticos mostram diferenças significativas no desempenho à fadiga entre os lotes.

Outro trabalho que investiga o processo de Fadiga dos parafusos em torres eólicas, porém da raiz da pá e torres offshore é o trabalho de Zheng e Chen (2022), porém ele investiga as respostas de tensão dos parafusos de raiz da lâmina são calculadas por meio da técnica de elementos finitos (FE). A previsão da vida útil em fadiga dos parafusos de raiz da lâmina é então realizada com o uso de curvas S-N e regra de Palmgren-Miner (PM).

Outro trabalho relevante que investiga o processo de fadiga em parafusos de torres eólicas é o de Zheng e Chen (2022). Este estudo, focado especificamente na raiz da pá e em torres offshore, adota uma abordagem metódica para entender as respostas de tensão dos parafusos. Os autores utilizam a técnica de elementos finitos (FE) para calcular essas tensões, proporcionando uma análise detalhada e precisa das condições de operação dos parafusos na raiz da lâmina. Em seguida, a previsão da vida útil em fadiga desses parafusos é realizada por meio do uso das curvas S-N e da regra de Palmgren-Miner (PM). Essa metodologia permite uma avaliação robusta da durabilidade dos componentes, integrando os resultados de simulações numéricas com técnicas clássicas de previsão de fadiga, oferecendo assim uma compreensão abrangente dos fatores que influenciam a longevidade dos parafusos nas condições específicas das torres eólicas offshore.

Com o objetivo de suprir as lacunas na literatura, este trabalho tem como objetivo investigar a composição do aço, microestrutura, propriedades mecânicas e corrosivas do elemento de fixação. O material utilizado no estudo se trata de um parafuso prisioneiro empregue na conexão das pás eólicas ao cubo, recebido de uma empresa do estado do Ceará. Esta empresa relata falhas e rompimentos causados por fadiga no parafuso. Esses parafusos são geralmente feitos de aço de médio carbono e este trabalho investiga a composição do aço, microestrutura, propriedades mecânicas e corrosivas. A partir disto, é verificado se é adequado para o uso em turbinas eólicas, a qual sofre cargas variedade de fontes, como vento fortes, cargas periódicas de cisalhamento do vento, cargas transitórias de eventos, entre outros esforços.

A análise microestrutural é realizada neste trabalho identificando a microestrutura do componente e propor um tratamento térmico de têmpera e revenimento e avaliar as propriedades mecânicas e corrosivas do material após esse tratamento, propondo melhoria a empresa que possui a problemática da fratura com seu elemento de fixação.

## 1.1 Objetivos

Este estudo visa a caracterização da microestrutura e da resistência mecânica e corrosiva do aço empregado na produção dos parafusos prisioneiros utilizados para a fixação entre as pás e o cubo (Hub) de aerogeradores. Para alcançar este propósito, o aço será submetido a testes em duas condições distintas: na sua configuração original, tal como utilizado nos aerogeradores, e após ter sido submetido ao tratamento de têmpera e revenimento. A consecução deste objetivo requer a realização dos seguintes objetivos específicos:

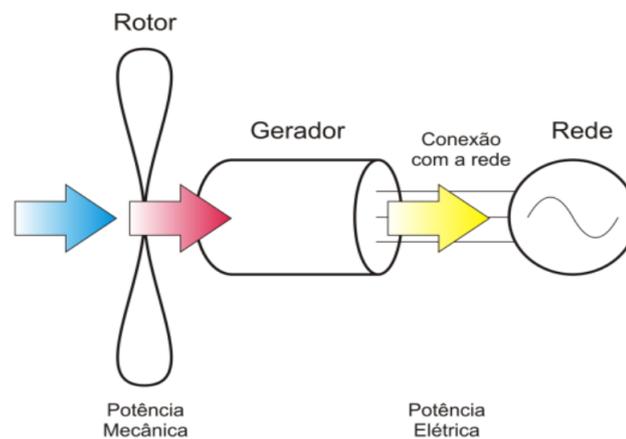
- Realizar análises microestruturais do aço utilizado nos parafusos prisioneiros, tanto na sua forma original, quanto após o tratamento de têmpera e revenimento;
- Avaliar a resistência mecânica do aço por meio de testes de tração, ensaios de dureza e impacto charpy, comparando os resultados entre as diferentes condições de tratamento;
- Investigar a resistência à corrosão do aço, por meio dos ensaios de Polarização Potenciodinâmica Cíclica e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, em ambientes simulados (3,5% NaCl), representativos das condições operacionais dos aerogeradores;
- Fornecer recomendações práticas para a otimização do processo de fabricação dos parafusos prisioneiros, visando melhorar sua durabilidade e desempenho em serviço.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Turbinas eólicas

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica envolve dois processos de conversão de energia que, de forma geral, são executados: pelo rotor, que converte energia cinética do vento em mecânica e, posteriormente, pelo gerador que converte esta energia em eletricidade alimentando o sistema elétrico. O princípio geral de funcionamento está representado na Figura 4. Embora pareça bastante simples, uma turbina eólica é um sistema complexo, assim, conhecimento em diversas áreas da engenharia, tais quais, aerodinâmica, mecânica, eletromagnetismo e controle são necessários.

Figura 4 – Princípio de funcionamento de uma turbina eólica.



Adaptada de Slootweg e Kling (2003)

#### 2.1.1 Componentes dos aerogeradores

A estrutura fundamental de um gerador eólico compreende quatro elementos principais: o rotor, pás, a nacele e a torre. As pás do rotor desempenham o papel crucial na captação da energia proveniente dos ventos, transferindo a energia cinética assim obtida para o gerador, situado no interior da nacele. Esta última é o espaço que abriga uma série de componentes essenciais para o funcionamento deste tipo de geração, incluindo o gerador elétrico, a caixa multiplicadora de velocidades, eixos, mancais, mecanismos de orientação da turbina e um sistema de freios.

É importante salientar que os geradores elétricos utilizados nesta modalidade de geração eólica podem ser classificados em duas categorias distintas. Os motores de indução, também conhecidos como assíncronos, demonstram-se adequados para sistemas dotados

de caixa multiplicadora que mantêm uma rotação constante. Por outro lado, os geradores síncronos mostram-se capazes de operar eficientemente em sistemas caracterizados por uma rotação variável (REN et al., 2021).

Esta diferenciação entre os tipos de geradores elétricos empregados na geração eólica evidencia a importância de selecionar cuidadosamente os componentes adequados para cada aplicação, visando otimizar o desempenho e a eficiência do sistema como um todo.

Os mecanismos de giro também são de extrema importância para a geração eólica, sendo que este tipo de sistema ajuda as turbinas de eixo horizontal a se alinharem à de maior incidência de ventos, otimizando assim a geração. As turbinas de eixo vertical não possuem a necessidade de possuírem este tipo de mecanismo, pois elas conseguem captar os ventos em qualquer direção (LIAO et al., 2022).

Outro elemento da nacelle que merece destaque é a caixa multiplicadora de velocidades, cuja função primordial reside na adaptação da velocidade de rotação do rotor à velocidade de rotação do gerador. Este aspecto reveste-se de particular importância, pois os rotores utilizados nesse contexto de geração eólica frequentemente operam com uma velocidade de rotação inicialmente reduzida, resultado da baixa velocidade dos ventos. Assim, torna-se imperativo a utilização de um dispositivo capaz de amplificar essa velocidade a fim de adequá-la aos requisitos dos geradores (REN et al., 2021).

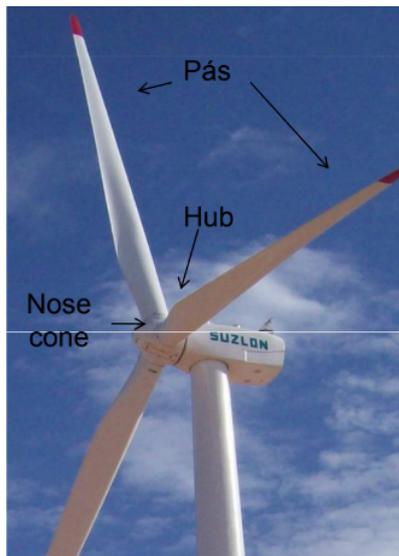
#### 2.1.1.1 Rotor

O rotor, componente essencial do aerogerador, desempenha uma função crucial ao fixar as pás aerodinâmicas. Reconhecidamente, o rotor se destaca como um dos componentes mais pesados do conjunto. No entanto, sua importância transcende a mera função de fixação. Além de sustentar as pás, o rotor exerce um papel dinâmico ao proporcionar o movimento rotativo necessário para que estas possam eficientemente captar a energia dos ventos. Esse movimento é essencial para orientar as pás no ângulo de ataque ótimo, maximizando assim a captura da energia eólica disponível (SANTOS, 2022).

O rotor de um aerogerador é composto por três componentes principais: as pás (também conhecidas como rotor blades), o cubo (Hub) e o cone do nariz (Nose Cone), conforme ilustrado na Figura 5. Esses elementos desempenham papéis distintos e complementares no processo de captação da energia eólica e sua conversão em energia mecânica, destacando a importância do rotor como uma unidade funcional e integrada dentro do contexto do aerogerador.

Em termos estruturais, a pá de um aerogerador é composta por um casco externo formado por duas conchas de material compósito, unidas e suportadas por uma viga principal ou estrutura central. Os materiais comumente utilizados na fabricação dessas

Figura 5 – Componentes do Rotor.



Adaptada de Wilson e Lissaman (2018)

pás incluem poliéster ou epóxi reforçado com fibra de vidro. Além disso, pesquisas em andamento exploram a viabilidade do uso de compostos de madeira, tais como madeira-epóxi ou madeira-fibra-epóxi, como alternativas promissoras (IBERDROLA, 2024).

A configuração básica de uma pá eólica pode ser simplificada dividida em quatro partes distintas: a ponta (Tip), o corpo da pá, a raiz (Raiz da pá) e o flange (Flange da pá), conforme a Figura 6. Essa divisão simplificada ajuda a compreender a estrutura e a funcionalidade da pá dentro do contexto do aerogerador.

Figura 6 – Componentes da Pá Eólica.



Adaptada de Wilson e Lissaman (2018)

O flange da torre eólica constitui um componente estrutural fundamental que facilita a conexão entre as diferentes seções da torre, bem como entre a torre e o cubo do aerogerador, e entre as pás e o cubo central (HUB). Geralmente, essa conexão é realizada

por meio de parafusos estruturais, que desempenham um papel crucial na integridade e na estabilidade da estrutura como um todo. A função dos parafusos estruturais é garantir uma união segura e robusta entre os componentes, permitindo o funcionamento eficiente e confiável do aerogerador sob diversas condições operacionais (PENG et al., 2022).

Os parafusos estruturais de alta resistência, representam um elemento amplamente adotado para a conexão de componentes de aço em diversas estruturas, como pontes, máquinas de construção e, especificamente, turbinas eólicas. Estas aplicações demandam suportar cargas elevadas e tensões de tração significativas. No caso de uma turbina eólica convencional, cada uma das pás do rotor deve ser rigidamente unida ao cubo (Hub), requer até 160 conjuntos de parafusos de alta resistência para efetuar as conexões necessárias, conforme Figura 7. O cubo (Hub) do aerogerador é equipado com três engrenagens e três rolamentos, cuja função é proporcionar o movimento de passo para as pás conforme Figura 8.

Figura 7 – Conjuntos de parafusos para união das pás ao Hub.



Adaptada de Ebrahimi e Ghassemi (2018)

Figura 8 – Cubo (Hub) do Aerogerador.

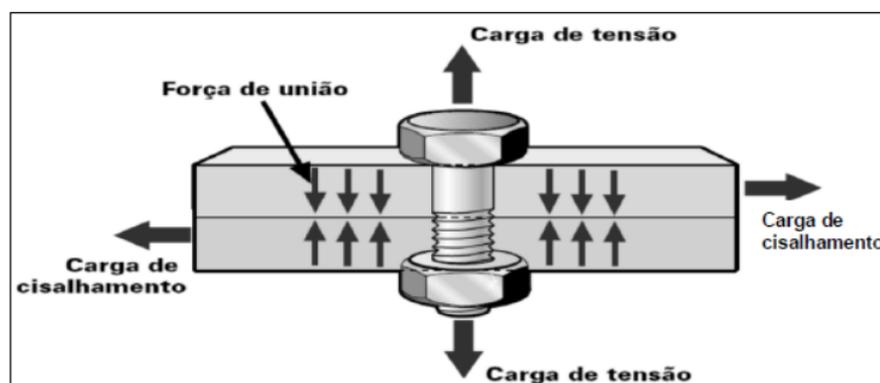


Adaptada de Ebrahimi e Ghassemi (2018)

### 2.1.1.2 Uniões parafusadas

Juntas aparafusadas são muito aplicadas em junções mecânicas com o objetivo de unir e/ou fixar peças, e é uma solução de projeto responsável por quase todos os sistemas que requerem uma posterior desmontagem. Uma junta é constituída de três elementos: o parafuso com rosca externa; a contra peça que é quem sofrerá toda resultante da força aplicada no momento do aperto e que não pode sofrer nenhuma deformação plástica; e por fim a porca com rosca interna (CUNHA et al., 2005). A Figura 9 exemplifica os tipos de solicitações a que estão sujeitas as juntas aparafusadas.

Figura 9 – Representação das forças que atuam sobre uma junta aparafusada.



Adaptada de Cunha et al. (2005)

Em uma junta aparafusada à tração, os parafusos devem apertar uma peça contra a outra com força para prevenir a separação ou vazamento. Coincidentemente, a tração no parafuso deve ser grande o suficiente para prevenir auto afrouxamento quando exposto a vibração, choque, ou ciclos térmicos. Alta tensão no parafuso pode torná-lo menos susceptível a fadiga, mas algumas vezes mais susceptível a trincamento por tensão (BHANDARI, 2020).

As juntas aparafusadas sujeitas a carregamentos dinâmicos possuem uma tendência ao afrouxamento. Geralmente o problema está mais ligado a pré cargas insuficientes que cargas excessivas. A questão de pré cargas inadequadas é associada ao método de aperto usado, somado as condições de atrito (BHANDARI, 2020).

Nos aerogeradores, os parafusos de fixação desempenham uma função crucial na manutenção da integridade estrutural, conectando as pás ao cubo (hub) e assegurando estabilidade e desempenho seguros. As falhas nos parafusos de fixação podem ser atribuídas a diversos fatores, como cargas dinâmicas contínuas resultantes da variação da velocidade do vento, que podem induzir fadiga nos parafusos; corrosão devido à exposição a condições ambientais adversas, como umidade e salinidade, particularmente em locais costeiros; e eventos extremos, como rajadas de vento ou falhas nos sistemas de controle do aerogerador, que podem ocasionar sobrecargas nos parafusos de fixação (HANSEN, 2015).

O fenômeno da fadiga ocorre devido a cargas cíclicas, resultando na formação de rachaduras ou até mesmo na completa falha dos parafusos. Seleções inadequadas de materiais também podem levar a uma resistência insuficiente para suportar as cargas aplicadas (HANSEN, 2015).

## 2.2 Aços aplicados na produção de parafusos

Atualmente, o aço é a liga metálica mais importante e pode ser utilizada na fabricação de máquinas e ferramentas aplicadas em diversos setores. O aço também pode ser usado na produção de outras ligas metálicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

O teor de Carbono nesse material influi diretamente nas suas propriedades mecânicas e, normalmente, é inferior a 1%p. Alguns aços são classificados de acordo com a sua concentração de carbono, quais sejam, os tipos com baixo, médio e elevado teor de carbono. Existem também subclasses dentro de cada grupo, de acordo com as concentrações de outros elementos de liga. Sendo assim, os aços comuns ao carbono contêm apenas concentrações residuais de impurezas além do carbono e de manganês. Já no caso dos aços-liga, mais elementos de liga são adicionados intencionalmente em concentrações específicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Os parafusos empregados nas estruturas de torres eólicas são habitualmente confeccionados a partir de aço de médio teor de carbono, destacando-se por sua elevada resistência, sendo categorizados na classe 10.9. Estes elementos são rotineiramente expostos a regimes de carga cíclica intensa, com estimativas situadas em uma faixa notável entre  $10^6$  e  $10^{10}$  ciclos (SHAKERI et al., 2022).

O primeiro dígito, que representa 10, multiplicado por 100, estabelece a resistência à tração na ruptura em  $N/mm^2$ , resultando em  $1000 N/mm^2$ . Por outro lado, o segundo dígito, acompanhado do ponto decimal (.9), quando multiplicado por 1000, denota o valor nominal do limite de escoamento em  $N/mm^2$ . Em outras palavras, equivale a  $900 N/mm^2$ . Destaca-se que ultrapassar esse limite ocasiona uma deformação plástica permanente no material (SHAKERI et al., 2022).

### 2.2.0.1 Aço 4140

O aço da série 4140, também chamado de aço-cromo-molibdênio é classificado como aço médio carbono ligado para beneficiamento. Sua tensão de ruptura após tratamento térmico de têmpera é de aproximadamente 1650 MPa. Esse aço pode ser utilizado a temperaturas altas como 480 °C onde acima dessa temperatura a tensão de ruptura decresce rapidamente (VOORT et al., 2004).

Tal aço é utilizado em aplicações que requerem condições de endurecimento mode-

rado e suas aplicações exigem que ele apresente uma excelente resistência com suficiente tenacidade e ductilidade para realizar suas atividades. Os processos convencionais para conseguir tais características é a têmpera e o revenimento (TOTTEN, 2006).

Os valores para a sua composição química são especificados pela Norma NBR NM 87:2000 e estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição Química do aço AISI 4140.

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>Si</b>	<b>S</b>
0,38 – 0,43 %	0,8 – 1,10 %	0,15 – 0,25 %	0,75 – 1,00 %	0,035 % Máx.	0,15 – 0,30 %	0,04 % Máx

## 2.3 Tratamentos térmicos aplicados em parafusos

Os tratamentos dos aços podem ser definidos como sendo os processos a que os aços são submetidos a fim de melhorar as suas propriedades mecânicas sem alterar, contudo, a sua composição química (TOTTEN, 2006).

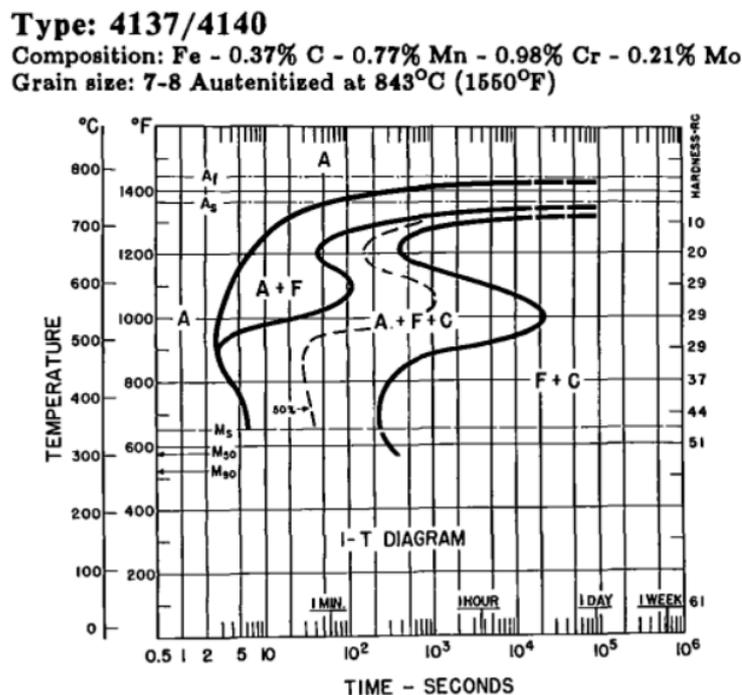
De acordo com CHIAVERINI (2005) tais tratamentos térmicos podem ser descritos por ciclos de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidades de aquecimento e resfriamento, com o objetivo de alterar as propriedades de certos materiais metálicos, conferindo-lhes características determinadas e causando modificações em suas microestruturas sem que haja mudanças na forma do produto.

Para o maior domínio sobre o processo de tratamento térmico é necessário conhecer a curva Tempo-Temperatura-Transformação (TTT) para o material. Tal curva ajuda a prever os microconstituintes do material e suas transformações de fase, sendo possível achar qual será a dureza do material após o ciclo térmico (PINEDO, 2021).

Na Figura 10 está ilustrado o diagrama TTT para o aço AISI 4140. Neste diagrama, o tempo de transformação em uma determinada temperatura é representado através da transformação isotérmica, que ocorre numa temperatura fixa após um resfriamento instantâneo. Podemos observar as linhas horizontais  $M_s$  e  $A_f$ , que marcam o início e o fim da transformação da austenita em martensita (PINEDO, 2021).

Os parafusos pertencentes à classe 10.9 são submetidos a processos de endurecimento por meio de tratamentos térmicos convencionais, os quais englobam as etapas de austenitização, têmpera e posterior revenimento, resultando em uma microestrutura composta por martensita revenida. A fabricação das roscas dos parafusos é realizada por laminação, podendo ocorrer antes ou após o tratamento térmico. Quando a formação das roscas é realizada após o tratamento térmico, ocorre a introdução de tensões residuais

Figura 10 – Curva Tempo-Temperatura-Transformação Aço AISI 4140.



Extraída de Voort (1991)

de compressão na microestrutura deformada das raízes das roscas, o que pode ocasionar um aumento significativo na resistência à fadiga desses componentes (STEPHENS et al., 2005).

### 2.3.1 Têmpera

A têmpera, como os outros tratamentos térmicos, é constituída por três fases: o aquecimento, o estágio à temperatura de têmpera e o resfriamento. O aquecimento do aço visa uma austenitização total (aços hipoeutetoides) ou parcial (aços hipereutetoides) seguido de um resfriamento, tal que se consiga evitar a transformação da austenita nos seus produtos de decomposição a temperaturas mais altas (ferrita ou cementita + perlita), dando lugar preferencialmente à transformação em martensita (EDITORA, 2018).

A martensita é uma estrutura metaestável que não se forma em condições de equilíbrio. Ela possui uma energia livre maior que a da perlita e ferrita, porém, em baixas temperaturas ela pode se manter estável, conferindo aos aços maiores durezas e resistências mecânicas. Porém, este aumento na resistência mecânica causa uma elevada redução na ductilidade, resultando num material extremamente frágil, inviabilizando a utilização do mesmo (PINEDO, 2021).

Para que tenhamos uma têmpera bem sucedida deveremos levar em conta vários fatores. Primeiramente, a velocidade de resfriamento deve ser o suficiente para impedir

a transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas, em qualquer parte da peça que se deseja endurecer. Sendo assim, as dimensões das peças a serem temperadas constituem um fator importante pois podem determinar diferenças de esfriamento entre a superfície e o centro. Vale ressaltar que em peças pequenas ou de pequena espessura a diferença é desprezível. O mesmo, no entanto, não ocorre com peças de grandes dimensões, no centro das quais a velocidade de esfriamento é menor do que na superfície, resultando em estruturas de transformação mistas (CHIAVERINI, 2005).

Um dos grandes problemas relacionados com o tratamento térmico de têmpera está ligado com a baixa ductilidade e a baixa tenacidade do material após o tratamento. Embora tenhamos um significativo ganho na resistência mecânica e na dureza, fatores primordiais quando se quer reduzir o peso da peça ou evitar o desgaste superficial, a ductilidade cai quase à zero. A utilização de um aço nestas condições é impossível, devido aos riscos de uma falha catastrófica, portanto, para a correção de tal problema é realizado o tratamento térmico de revenimento (TOTTEN, 2006).

A temperatura de austenitização do aço AISI 4140 é de 843°C (VOORT, 1991). Respeitando-se a geometria dos corpos de prova desenvolvidos e visando uma distribuição uniforme de temperatura, deve-se utilizar um tempo de patamar de 1 hora para cada 25mm de espessura do componente. Cabe ressaltar que as temperaturas acima de 950°C resultam no aumento do tamanho de grão austenítico causando perda de tenacidade do aço.

### 2.3.2 Revenimento

O tratamento de revenimento é um processo no qual o aço previamente temperado ou normalizado é geralmente aquecido a uma temperatura abaixo da temperatura crítica e resfriado a uma taxa adequada, principalmente para aumentar a ductilidade e a tenacidade, mas também para aumentar o tamanho de grão da matriz. Os aços são revenidos pelo reaquecimento após o endurecimento para obter valores específicos das propriedades mecânicas e também para aliviar as tensões de resfriamento e garantir a estabilidade dimensional. O revenimento também é usado para aliviar as tensões e reduzir a dureza desenvolvida durante a soldagem e para aliviar as tensões induzidas pela formação e usinagem (VOORT et al., 2004).

O tratamento térmico de têmpera e revenimento em aços como o AISI 4140, pode levar a um indesejado fenômeno definido como fragilização da martensita revenida (FMR). Este fenômeno é responsável por reduzir a capacidade de absorção da energia de impacto à temperatura ambiente de corpos de prova entalhados, ou ainda reduzir as propriedades de tração de amostras sem entalhe ensaiadas a temperaturas sub-zero (CHIAVERINI, 2005).

De acordo com Pinedo (2021), as temperaturas nas quais são realizados os trata-

mentos térmicos de revenimento estão sempre abaixo da temperatura crítica (temperatura onde se inicia a formação de austenita). No entanto, existem algumas faixas de temperatura “proibidas” em função da fragilização de alguns tipos de aços. CHIAVERINI (2005) pontua que a faixa de temperatura em que o aço AISI 4140 temperado e revenido absorve menos energia será entre 250 °C e 350 °C. Portanto, podemos associar essa faixa de temperatura ao fenômeno de FMR.

A fragilização ocorre pelo efeito combinado da segregação de impurezas tais como P, S, N, Sb e Sn nos contornos de grão durante a fase de austenitização do aço e da precipitação de carbonetos nos contornos de grão durante o revenimento nesta faixa de temperatura (SOUZA, 1989). Um fator que também influi no fenômeno da FMR é a temperatura de austenitização do aço, pois quanto maior for esta temperatura, mais intensa é a segregação das impurezas, maior será o crescimento dos grãos e conseqüentemente menos grãos terá sua estrutura cristalina. Isso faz com que haja uma menor área de contornos de grãos disponíveis para a segregação das impurezas e carbonetos, fazendo com que o efeito seja potencializado (CHIAVERINI, 2005).

## 2.4 Propriedades mecânicas de parafusos

Muitos materiais, quando em serviço, são submetidos a forças ou cargas; exemplos incluem a liga de alumínio a partir da qual uma asa de avião é construída e o aço do eixo da roda de um automóvel. Em tais situações é necessário conhecer as características do material e projetar o elemento estrutural a partir do qual ele é feito de tal maneira que qualquer deformação resultante não será excessiva e a fratura do material não ocorrerá. O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

As propriedades mecânicas de materiais são apuradas (determinadas) pela execução de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados que replicam tanto quanto possível as condições de trabalho. Fatores a serem considerados incluem a natureza da carga aplicada e a sua duração, bem como as condições ambientais (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

A determinação das propriedades mecânicas de um material metálico é realizada por meio de vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou inutilização do material. Nessa categoria, estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão entre outros. Os ensaios de dureza que, embora possam, em certos casos, não inutilizar a peça ensaiada, também está incluído nessa categoria .

A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada produto metálico depende da finalidade do material, dos esforços que esse material vai

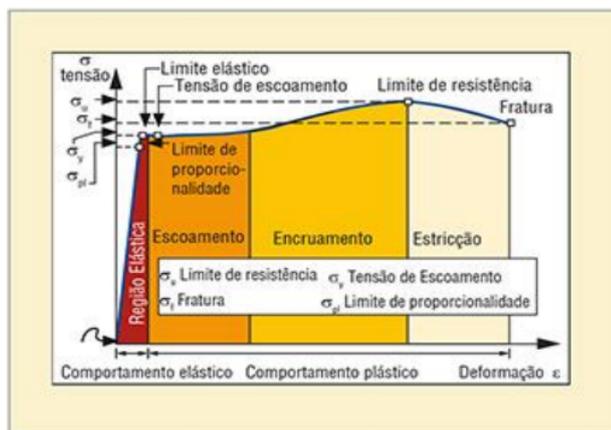
sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir. Os ensaios mecânicos podem também servir para comparação de materiais distintos e, juntamente com a análise química do material, avaliar a grosso modo a história prévia de um material desconhecido, sem a necessidade de um exame metalográfico mais demorado, isto é, avaliar o tipo de material, o processo de fabricação e sua aplicação possível (SOUZA, 1982).

### 2.4.1 Ensaios mecânicos aplicados em parafusos

#### 2.4.1.1 Ensaio de tração

Entre os diversos tipos de ensaios disponíveis para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais amplamente utilizado é o ensaio de tração, por ser um tipo de ensaio relativamente simples e de realização rápida além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto e fabricação de peças e componentes. Esse tipo de ensaio utiliza corpos de prova preparados segundo as normas técnicas convencionais (no Brasil, a norma utilizada para materiais metálicos é a NBR-6152, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT) e consiste na aplicação gradativa de carga de tração uniaxial às extremidades do corpo. O levantamento da curva de tensão de tração pela deformação sofrida, Figura 11, pelo corpo constitui o resultado do teste de tração (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Figura 11 – Curva Tensão x Deformação.



Extraída de Garcia, Spim e Santos (2000)

Durante o carregamento do material, observa-se, inicialmente um período em que a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada. Nesta fase, a deformação é permanente, isto é, removido o carregamento, a deformação desaparece. Esta fase é chamada de fase elástica do material e a constante de proporcionalidade que relaciona a tensão com a deformação é denominada módulo de elasticidade (E). Assim,

$$\sigma_e = E \times \varepsilon_E \tag{2.1}$$

A deformação elástica, reversível, acontece pelo aumento das distâncias interatômicas no material. Durante a deformação elástica, o volume do material se conserva (COSTA; MEI et al., 2010).

O limite superior para essa relação linear é denominado limite de proporcionalidade,  $\sigma_{lp}$ . Se a tensão ultrapassar ligeiramente o limite de proporcionalidade, o material ainda pode responder de maneira elástica; todavia a reta tende a encurvar-se e achatar-se. Isso continua até a tensão atingir o limite de elasticidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Um pequeno aumento na tensão acima do limite de elasticidade resultará no colapso do material e fará com que ele se deforme permanentemente. Esse comportamento é denominado escoamento e é indicado pela segunda região da curva. A tensão que causa escoamento é denominada tensão de escoamento ou ponto de escoamento,  $\sigma_e$ , é a deformação que ocorre é denominada deformação plástica (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

#### 2.4.1.2 Ensaio de dureza

A dureza de um material é um conceito relativamente complexo de se definir, originando diversas interpretações. No dicionário, dureza é qualidade ou estado de duro, rijeza. Duro, por sua vez, é definido como difícil de penetrar ou de riscar, consistente, sólido. Essas definições não caracterizam o que é dureza para todas as situações, pois ela assume um significado diferente conforme o contexto em que é empregada (SOUZA, 1982).

Souza (1982) enfatiza que na área da metalurgia, considera-se dureza como a resistência à deformação plástica. Isso porque uma grande parte da metalurgia consiste em deformar plasticamente os metais. Já na área da mecânica, dureza é a resistência à penetração de um material duro no outro, pois essa é uma característica que pode ser medida.

Apesar das diversas definições, um material com grande resistência à deformação plástica permanente também terá alta resistência ao desgaste, alta resistência ao corte e será difícil de ser riscado, ou seja, será duro em qualquer uma dessas situações (??).

Geralmente, um teste de dureza consiste em pressionar um penetrador de geometria e propriedades mecânicas conhecidas no material de teste. A dureza do material é quantificada usando uma de uma variedade de escalas que indicam direta ou indiretamente a pressão de contato envolvida na deformação da superfície de teste. Como o penetrador é pressionado no material durante o teste, a dureza também é vista como a capacidade de um material resistir a cargas de compressão (VOORT et al., 2004).

Para Souza (1982) o conceito de dureza não é o mesmo para todas as suas aplicações e sob esse ponto de vista, pode-se dividir o ensaio de dureza em três tipos principais, que dependem da maneira com que o ensaio é conduzido:

1. por penetração
2. por choque
3. por risco

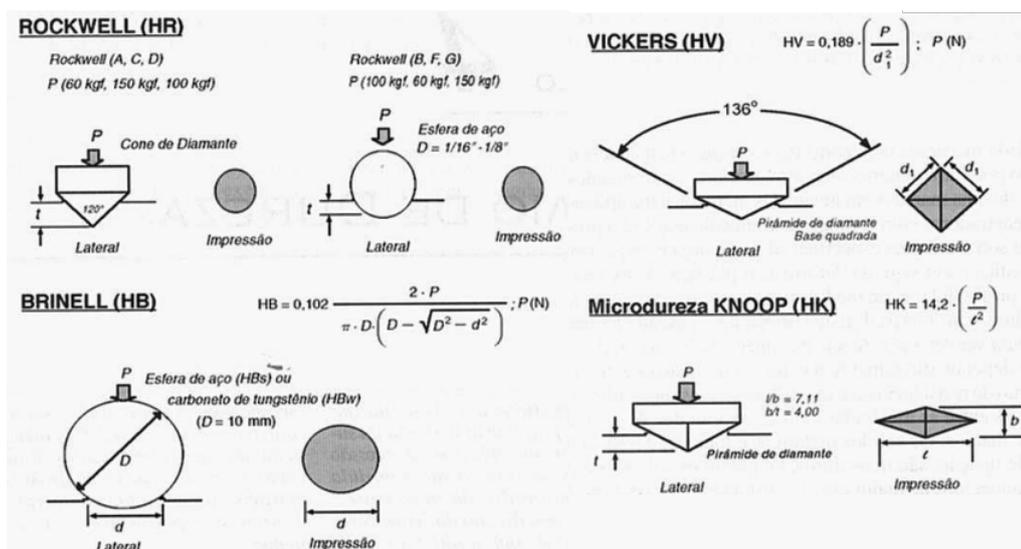
Os diversos ensaios de dureza existentes possibilitam uma excelente cobertura de todas as gamas usuais de durezas e dimensões encontradas nos aços. Além disso, o ensaio de dureza corretamente escolhido e interpretado é uma excelente ferramenta para o controle indireto das propriedades mecânicas, a baixíssimo custo, comparado com as demais opções existentes (COSTA; MEI et al., 2010).

Existem ensaios de dureza estáticos e dinâmicos. Dentre os ensaios estáticos, estão os ensaios de Rockwell e Brinell, que são testes empregados para aços na maioria dos casos. Mais especificamente, os ensaios de Rockwell é bastante empregado, pois é um ensaio de maior simplicidade, rapidez, ampla faixa de medidas e obtêm-se uma medida direta.

Os Principais ensaios de dureza, Figura 12, são:

- Dureza Brinell
- Dureza Rockwell
- Dureza Vickers
- Microdureza Knoop

Figura 12 – Tipos de ensaios de dureza.



Extraída de Callister e Rethwisch (2020)

De acordo com RODRIGUES (2015), um mínimo de três leituras deve ser realizado em cada amostra de parafuso acabado. Para testes de dureza arbitrários, a norma define

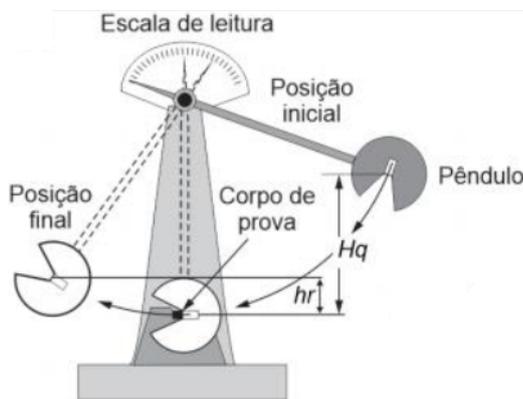
que a medição deve ser conduzida no raio médio da seção transversal da rosca tomada a uma distância de aproximadamente um diâmetro da extremidade. Quatro leituras devem ser efetuadas a aproximadamente  $90^\circ$  uma da outra, no mesmo plano, se o produto permitir.

### 2.4.1.3 Ensaio de Charpy

O método de ensaio de impacto Charpy é uma das técnicas empregadas para avaliar a resistência dos materiais quando submetidos a cargas de impacto específicas. Este procedimento visa quantificar a energia absorvida pelo material durante o processo de fratura, desempenhando um papel fundamental na garantia da segurança e confiabilidade dos componentes analisados. Consiste na utilização de um pêndulo de impacto, o qual é liberado de uma altura pré-determinada, ocasionando a ruptura do corpo de prova, inicialmente fixado em um suporte na base do equipamento. A diferença entre a altura alcançada pelo martelo após o impacto e a altura inicial do pêndulo proporciona a medida da energia absorvida pelo corpo de prova (GARCIA, 2012).

A Figura 13 apresenta esquema da máquina de impacto Charpy em suas diferentes posições. Mostrando os ângulos que e as alturas que são utilizados nos cálculos das energias final e inicial.

Figura 13 – Máquina de impacto Charpy.



Extraída de Garcia (2012)

A Figura 13 evidencia o equipamento usado no processo do ensaio de impacto Charpy e a posição horizontal em que o corpo de prova é posicionado durante este ensaio.

## 2.5 Corrosão em parafusos

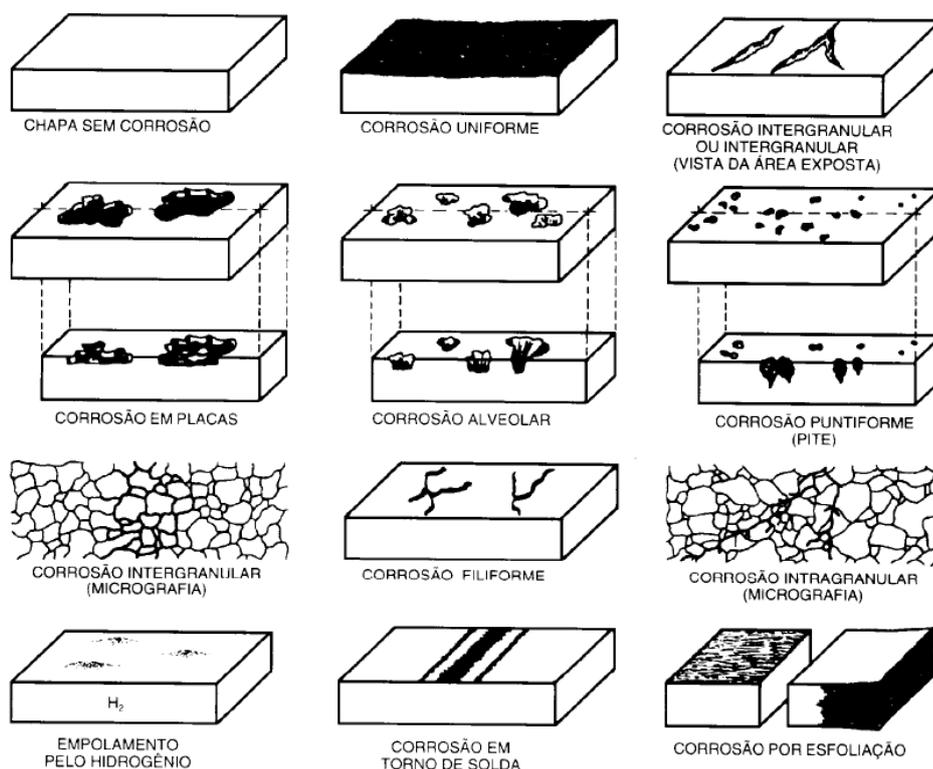
De acordo com Gentil (2011), a corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio em que interage aliada ou não a esforços mecânicos. A corrosão está relacionada com a oxidação de um metal para a formação de um composto mais estável termodinamicamente

nas condições a que está submetido. A deterioração representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais. Quando de natureza eletroquímica, o fenômeno corrosivo representa uma situação em que duas ou mais reações diferentes ocorrem simultaneamente e de forma espontânea, sendo pelo menos uma de natureza anódica e outra catódica. A reação anódica de dissolução do metal fornece elétrons à reação catódica de redução.

O processo corrosivo tem dependência direta do meio, logo fatores como salinidade, pH, temperatura, esforços mecânicos e ação microbiológica podem influenciar diretamente no processo corrosivo (GENTIL, 2011; GEMELLI, 2001).

Ainda, segundo Gentil (2011), a corrosão pode se manifestar de diferentes formas no material, sendo definidas principalmente pela aparência da superfície corroída. Dentre estas, vale ressaltar a corrosão uniforme, por placas, alveolar, por pite, intergranular e transgranular. A Figura 14 apresenta, de forma esquemática, algumas dessas formas.

Figura 14 – Principais formas de corrosão observadas em materiais metálicos.



Fonte: Gentil (2011)

### 2.5.1 Ensaios de corrosão

Os processos de corrosão são muito complexos e ocorrem sob condições bem distintas, os quais possibilitaram o desenvolvimento de vários métodos de ensaios. Alguns

destes ensaios têm sido padronizados para permitir a comparação entre resultados obtidos em diferentes lugares e laboratórios (RAMANATHAN, 2012).

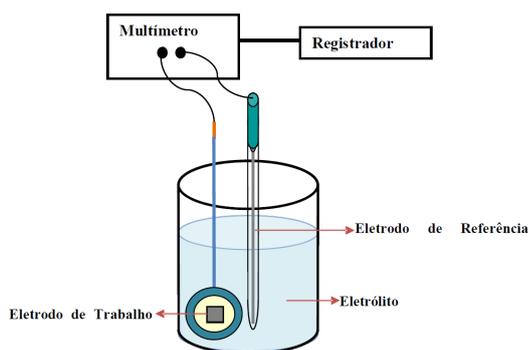
### 2.5.1.1 Potencial de Circuito Aberto (OCP)

O potencial de circuito aberto ( $E_{ca}$ ), também chamado de OCP é um dos parâmetros eletroquímicos de mais fácil determinação experimental e corresponde ao potencial de um eletrodo medido em relação a um eletrodo de referência. (WOLYNEC, 2003). O potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) é considerado como sendo o potencial de circuito aberto estacionário, isto é, o valor do potencial de circuito aberto constante ou quase constante, quando a condição estacionária ou quase estacionária for atingida na interfase metal-solução. O conhecimento do valor do  $E_{corr}$  pode fornecer informações valiosas, tanto em aplicações práticas de técnicas de proteção contra a corrosão, como nas investigações de processos corrosivos (WOLYNEC, 2003).

A medida de OCP é realizada através da medida direta do potencial do substrato revestido ou não em relação a um eletrodo de referência. O equipamento geralmente utilizado para essa medida consiste em um voltímetro de alta impedância que impede a passagem de fluxo de corrente apreciável pelo eletrodo de referência durante a medida (WOLYNEC, 2003).

A Figura 15 apresenta um esquema representativo de um arranjo experimental utilizado para a determinação do potencial de corrosão de uma superfície metálica.

Figura 15 – Esquema para medição do potencial de corrosão.



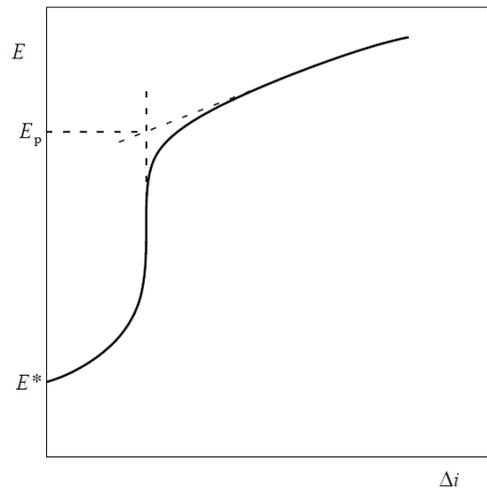
Fonte: Santos (2013).

### 2.5.1.2 Técnica Potenciocinética ou Potenciodinâmica

Na técnica potenciocinética ou potenciodinâmica efetua-se o levantamento da curva de polarização do metal dentro da solução de ensaio na direção anódica, a partir de um certo potencial (em geral a partir do  $E_{corr}$ ) e com uma velocidade de varredura padronizada. A densidade de corrente é inicialmente bastante pequena (da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>) e a mesma varia muito pouco com o aumento do potencial. Para metais

passiváveis, quando se atinge o potencial de pite ( $E_p$ ), ocorre um brusco aumento no valor da densidade de corrente, conforme ilustrado na Figura 16 (WOLYNEC, 2003). Já para metais não passiváveis, ocorre a dissolução uniforme da superfície do eletrodo.

Figura 16 – Curva de polarização típica obtida por meio da técnica potenciocinética ou potenciodinâmica para a determinação do  $E_p$ .



Fonte: Wolyneec (2003).

O  $E_p$  é normalmente considerado como sendo a intersecção da reta definida pela curva antes do aumento brusco da densidade de corrente com a reta definida pela curva após esse aumento.

Devido à sua simplicidade, esta técnica tem sido a preferida na determinação do  $E_p$ . Contudo, para metais não passiváveis, mesmo ocorrendo a corrosão por pite, não se observa o aumento brusco da densidade de corrente, conforme ilustrado na Figura 16, o que torna a determinação desse potencial extremamente difícil ou mesmo impossível. Nesses casos, tem-se em geral um contínuo, porém não brusco, aumento da densidade de corrente desde o potencial em que se iniciou o levantamento da curva de polarização até o provável  $E_p$ . Além disso, tem-se argumentado também que, devido à inércia do processo de varrimento de potencial, o  $E_p$  medido por esse método é normalmente maior do que o seu valor verdadeiro (WOLYNEC, 2003).

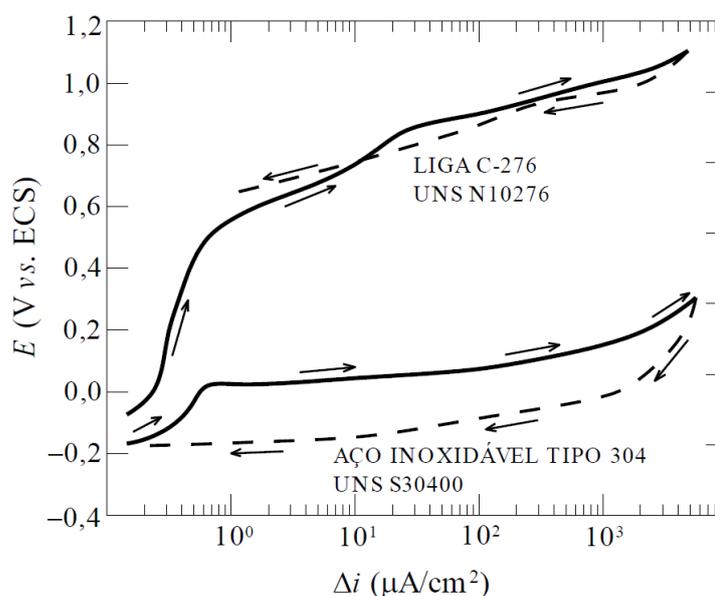
### 2.5.1.3 Polarização Potenciodinâmica Cíclica (PPC)

A técnica potenciodinâmica é frequentemente estendida para a técnica de polarização potenciodinâmica cíclica, pela qual, além do  $E_p$ , pode também ser determinado o potencial de repassivação ( $E_{rp}$ ). Os procedimentos dessa técnica estão especificados na norma ASTM G61 (1993). Essa técnica consiste inicialmente no mesmo procedimento descrito acima e quando a densidade de corrente, após o aumento brusco, atinge um determinado valor, faz-se a reversão da direção de varredura do potencial. Com isso, a

densidade de corrente em geral volta a diminuir e a varredura na direção catódica é continuada até a curva descendente cruzar com a curva ascendente (obtida durante a varredura inicial na direção anódica), ou até passar a assumir valores negativos.

O  $E_{rp}$  corresponde ao potencial em que a curva descendente cruza o eixo dos potenciais de eletrodo, isto é, quando a densidade de corrente assume valor nulo. A Figura 17 mostra as curvas representativas de PPC, apresentadas na norma ASTM G61.

Figura 17 – Curvas representativas da polarização potenciodinâmica cíclica de duas ligas, determinadas a 25 °C em solução aquosa 3,56% NaCl (ASTM G61, 1993).



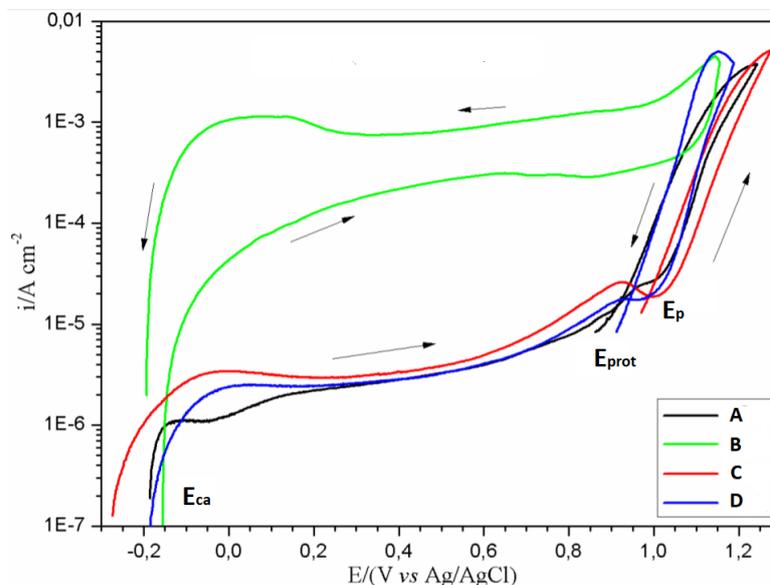
Fonte: Wolyneq (2003).

Na Figura 17 estão apresentadas as curvas do aço inoxidável austenítico tipo 304 (UNS S30400) e da liga C-276 (UNS N10276) (liga Ni-15Cr-2Co-3,5W-6Fe), ambas determinadas a 25 °C em solução aquosa 3,56% NaCl. Dos dois materiais, apenas o aço 304 sofre corrosão por pite, apresentando um  $E_p$  da ordem de +0,15 V e um  $E_{rp}$  da ordem de -0,21 V. A curva da liga C-276 não é resultante de corrosão localizada, mas, sim, de corrosão generalizada na região transpassiva ou de evolução do oxigênio. Desde que os potenciais de corrosão das duas ligas são bastante próximos, as curvas dessa figura indicam que a liga C-276 é mais resistente ao início e propagação da corrosão localizada do que o aço inoxidável 304.

Segundo Magnabosco (2001), o estudo mais aprofundado da corrosão localizada pode ser realizado através da análise de curvas de Polarização Potenciodinâmica Cíclica (PPC) do material imerso em solução contendo íons cloretos, apresentada na Figura 18.

Quando há formação de pites, a densidade de corrente sofre um brusco aumento causado pela desestabilização das películas (com a formação dos pites ocorre conseqüentemente, um aumento da área ativa do eletrodo que resulta no aumento da corrente) ou dos

Figura 18 – Esquema de curva de polarização cíclica de um aço inoxidável em solução contendo íons cloretos.



Fonte: Reis (2015).

equilíbrios formados na região passiva. A varredura de potencial é revertida no momento em que se atinge a densidade de corrente de reversão ( $i_{rev}$ ) previamente determinada. No momento em que a curva descendente cruza com a curva original, tem-se o chamado potencial de proteção ( $E_{prot}$ ), caracterizado por ser o patamar máximo de possibilidade de corrosão, ou seja, abaixo deste valor não existe quebra da película passiva ou sua não regeneração (MAGNABOSCO, 2001).

Entre a reversão de varredura de potencial e  $E_p$  ocorre a repassivação dos pites formados, logo a área formada pela curva entre  $E_p$  e  $E_{prot}$ , conhecido como laço de histerese da curva de polarização cíclica, corresponde à dificuldade em repassar os pites formados, ou seja, quanto menor for a diferença entre o potencial de pite e o potencial de proteção, a liga se torna mais resistente à corrosão por pite (POTGIETER, 1992).

#### 2.5.1.4 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

Em conjunto com a técnica de PPC, a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) é empregada na caracterização de sistemas eletroquímicos. Esta técnica eletroquímica envolve medições e análise de materiais em que a condução iônica predomina intensamente. A espectroscopia de impedância eletroquímica é importante no estudo de células combustíveis, baterias recarregáveis e corrosão (MACDONALD, 1992). Com esta técnica não estacionária, é possível analisar, através da variação da corrente com o tempo, a resposta da interface metal/solução a uma perturbação ao redor de um potencial. Esta variação se dá em função dos diferentes processos que ocorrem na interface no meio reacional (solução) e ao metal analisado (WALTER, 1986)

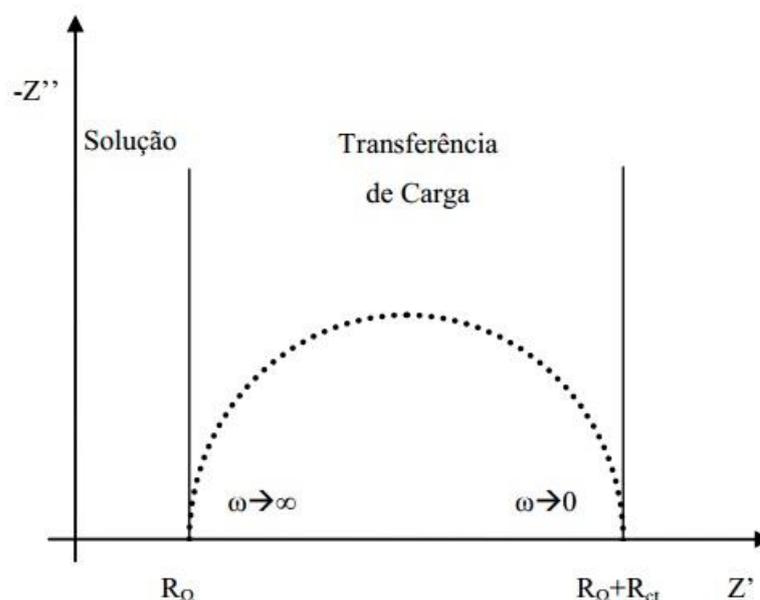
Uma das grandes vantagens da técnica de EIE é tratar-se de um ensaio não destrutivo, com a possibilidade de estudar as reações de corrosão e medir taxas de corrosão em meios de baixa condutividade. Para isto, a técnica utiliza-se de sinais muito pequenos que não perturbam as propriedades superficiais do eletrodo. Ela também permite determinar o parâmetro de resistência de polarização ( $R_p$ ), cujo valor é inversamente proporcional à velocidade de corrosão do material (WOLYNEC, 2003).

Nesta técnica, os valores obtidos são representados na forma de diagramas, sendo os mais comuns, o diagrama de Nyquist e o diagrama de Bode (WOLYNEC, 2003).

#### 2.5.1.4.1 Diagrama de Nyquist

Na Figura 19 tem-se a representação gráfica esquemática dos resultados pela curva de Nyquist, que permite a melhor visualização e análise dos resultados. Neste gráfico são plotados para cada excitação os valores das componentes real e imaginária da impedância.

Figura 19 – Representação esquemática do diagrama de Nyquist.



Fonte: Princeton (2008).

Os ensaios de EIE fornecem informações tais como; a reação interfacial de transferência de carga, a capacitância (relacionada com a natureza da superfície metálica, especialmente a natureza protetora dos filmes anódicos), a resistência de polarização ( $R_p$  - relacionada à densidade de corrente de corrosão), entre outras (GAO et al., 2009).

O espectro de impedância ideal é representado na forma de um semicírculo de raio  $0,5(R_{ct} - R_{\Omega})$  e centro  $R_{\Omega} + 0,5R_{ct}$ , onde  $R_{\Omega}$  e  $R_{ct}$  correspondem respectivamente a resistência do eletrólito e a resistência à transferência de carga. Os pontos que mostram os menores valores de frequência angular  $\omega$  estão à direita da curva e o ponto para  $\omega = 0$

está sobre a curva  $Z'$  (componente real) e corresponde a  $R_{\Omega}+R_{ct}$ . Conforme os valores de  $\omega$  aumentem, os pontos vão em direção contrária atingindo valor máximo para  $\omega_{máx}$ , e quando  $\omega \rightarrow \infty$  aproxima-se de  $Z'$ (componente real) no valor indicado por  $R_{\Omega}$  (BARD; FAULKNER et al., 2001; WALTER, 1986).

Entretanto, para ligas onde ocorre a formação de uma camada passiva na superfície do material, a literatura defende que essa camada se forma quando o cromo, em conjunto com outros elementos, entra em contato com o meio externo, criando o que é conhecido como camada ou filme passivo na superfície do aço. A corrosão em aços inoxidáveis inicia-se pela quebra dessa camada passiva em regiões onde ela apresenta defeitos, como inclusões, discordâncias, contornos de grão ou interfaces (SEDRIKS, 1996). A partir do diagrama de Nyquist é possível obter informações sobre a resistência à polarização na interface metal/solução (R). Essa informação corresponde a interseção da extrapolação do semi-arco capacitivo com o eixo das abscissas. Desta forma, arcos capacitivos menores levam a menores valores da resistência à polarização, ao passo que arcos com diâmetros maiores correspondem a resistência maiores. No caso de aços inoxidáveis, que apresentam um semi-arco, a resistência à transferência de carga pode ser avaliada por meio do diâmetro do semi-arco. Essa resistência indica a capacidade do filme de passivação em proteger a superfície metálica, em virtude deste se colocar entre o metal e a solução agressiva (BRYTAN; NIAGAJ et al., 2016).

## 3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritos o material a ser estudado assim como todos os procedimentos de ensaios e caracterizações seguidos neste trabalho para a obtenção dos resultados esperados.

### 3.1 Materiais

O material sujeito às análises subsequentes neste estudo é representado pelo parafuso do tipo prisioneiro, que foi fornecido ao Laboratório de Análise e Inspeção de Falhas (LIAF). Não foram fornecidas informações técnicas pelos doadores. A imagem do parafuso utilizado pode ser visualizada na Figura 20.

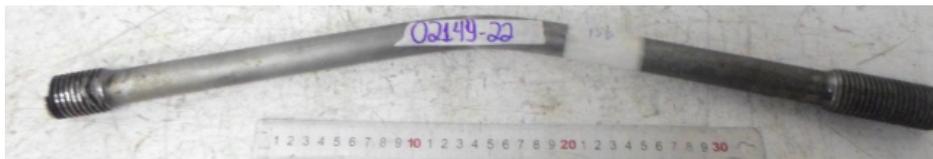
Figura 20 – Parafuso utilizado no estudo.



Elaborada pela autora (2024)

A empresa relata a ocorrência frequente de quebras dos parafusos em uso no parque eólico no Ceará, primeiramente a quebra ocorre na parte da rosca e após isso o parafuso tende a empenar, conforme Figura 21. Considerando a falta de informações sobre o material e as condições metalúrgicas do parafuso, optou-se por examinar primeiramente sua composição química e microestrutura e, posteriormente, conduzir tratamentos térmicos para avaliar o material em diferentes condições e investigar a possibilidade de melhorar suas propriedades mecânicas e corrosivas por meio desses tratamentos térmicos.

Figura 21 – Amostra indicando o processo de falha no parafuso.



Elaborada pela autora (2024)

Devido às suas dimensões, que totalizam 60 cm de comprimento, 36 mm de diâmetro na extremidade roscada e 25 cm na haste, o parafuso foi inicialmente cortado com o auxílio

de uma serra fita, adequada para esse propósito. Em seguida, as peças obtidas possuíam o tamanho apropriado para serem seccionada na cortadora metalográfica, obtendo peças da haste e da extremidade roscada do parafuso o que permitiu a obtenção de amostras destinadas aos ensaios específicos mencionados a seguir.

### 3.1.1 Análise da composição química

A análise da composição química da liga recebida foi realizada com o auxílio da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica. A fim de obter um resultado mais confiável, foi realizada uma série de 3 testes e obtida uma média do percentual de cada elemento presente na liga.

A especificação da composição química da liga fornecida, assim como a do aço AISI 4140, estão expressas, em porcentagem em massa, na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química da liga (% em massa).

Aço	C	Cr	Mo	Mn	P	Si	S
<b>Material estudado</b>	0,42	1,02	0,04	0,7176	0,0006	0,19	0,004
<b>AISI 4140</b>	0,38-0,43	0,8-1,10	0,15-0,25	0,75-1,00	0,035 Max	0,15-0,30	0,04 Max

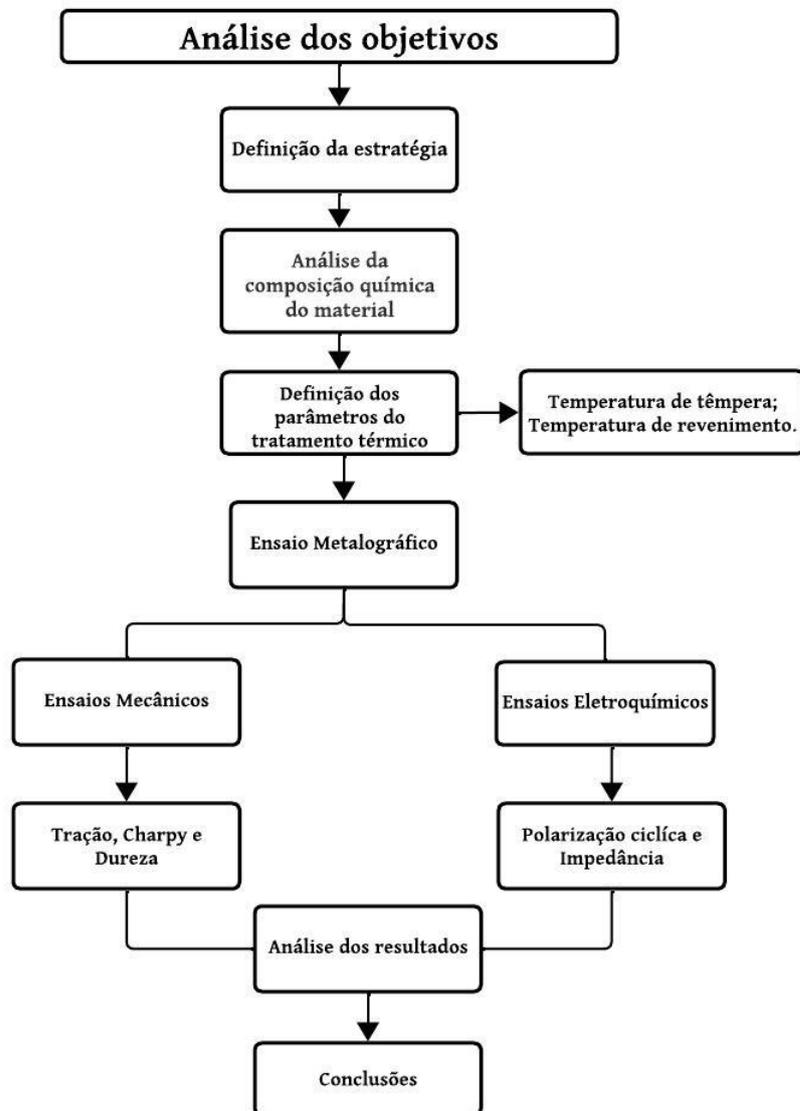
A partir do resultado obtido por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica, é possível verificar a semelhança da composição química do material fornecido com a do aço AISI 4140. Esta semelhança é esperada uma vez que esse material, um aço médio carbono, é bastante utilizado na fabricação de parafusos para a aplicação estudada.

A principal diferença na composição química do material estudado e do aço AISI 4140 trata-se do percentual de Molibdênio (Mo). O material estudado apresenta um valor menor de Mo, o que pode influenciar negativamente a resposta do aço ao tratamento térmico (temperado e revenido), assim como nas propriedades mecânicas e corrosivas (NUCCI, 2014).

## 3.2 Metodologia

Neste estudo, foram realizados tratamentos térmicos, têmpera a uma temperatura de 860 °C por 1 hora, seguida de resfriamento em óleo, e revenimento a uma temperatura de 390 °C. Essas etapas foram executadas com o objetivo de otimizar as propriedades mecânicas do aço, bem como melhorar sua resistência à corrosão. A metodologia empregada abrange fases, abordando tratamento térmico e a análise microestrutural e das propriedades mecânicas e corrosivas do material. O fluxograma da Figura 22 a seguir fornece um resumo esquemático das etapas e técnicas adotadas ao longo deste estudo.

Figura 22 – Fluxograma do procedimento experimental apresentando etapas seguidas e técnicas utilizadas neste trabalho.



Elaborada pela autora (2024)

### 3.2.1 Análise de Composição Química por Espectrometria de Emissão Óptica (OES)

Para a análise de Espectrometria de Emissão Óptica (OES), selecionamos duas amostras do parafuso, mantendo-as no estado original, ou seja, sem a aplicação de tratamento térmico. Em seguida, procedemos ao processo de lixamento até atingir a granulação 1200. Os ensaios de OES foram conduzidos no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará (UFC), com a realização de três análises de composição em cada amostra. O equipamento empregado para essas análises é um equipamento Espectrômetro de Emissão Óptica Shimadzu PDA7000, do Laboratório de

Caracterização de Materiais – LACAM, da Universidade Federal do Ceará, conforme Figura 23. O parâmetro de uso foi o padrão para aço baixa liga.

Figura 23 – Espectrômetro de Emissão Óptica utilizado neste trabalho.



Elaborada pela autora (2024)

### 3.2.2 Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento

Para realizar o tratamento térmico de têmpera e revenimento, utilizamos um Forno de Anel (Mufla) para laboratório, da marca EDG Equipamentos, modelo Edgcon 3P (Figura 24), disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará. Os parâmetros de processo escolhidos foram os seguintes: uma temperatura de têmpera de 890 °C, mantida por um período de 1 hora, seguida de um resfriamento em óleo. O revenimento foi realizado a uma temperatura de 390 °C, com duração de 40 minutos.

Figura 24 – Forno EDG utilizado no tratamento térmico.



Elaborada pela autora (2024)

Após o tratamento térmico, foram fabricados corpos de prova (CPs) para, inicialmente, caracterizar a microestrutura e conduzir ensaios de Tração, Dureza, Charpy e ensaios eletroquímicos.

### 3.2.3 Caracterização da Microestrutura

#### 3.2.3.1 Preparação das amostras

Para a preparação metalográfica padrão, o processo envolveu o corte das amostras em uma máquina de corte específica para amostras metalográficas. Posteriormente, as amostras foram incorporadas em baquelite e submetidas a uma sequência padrão de preparação metalográfica. Isso incluiu etapas de lixamento com granulometrias de 100, 220, 400, 600 e 1200 mesh, seguidas de polimento em pano metalográfico e utilização de pastas de diamante com tamanhos de partículas de 6, 3 e 1  $\mu m$ . Além disso, as amostras foram submetidas a um ataque químico utilizando uma solução de Nital 2%, composta por 2 ml de  $HNO_3$  e 98 ml de Álcool Etílico, com um tempo de exposição de 11 segundos. Todos os equipamentos utilizados nesse processo pertencem ao Laboratório de Materiais (LMAT) do Instituto Federal do Ceará (IFCE) - Campus Maracanaú.

#### 3.2.3.2 Microscopia Ótica

A etapa de microscopia ótica teve como objetivo possibilitar a observação da microestrutura das amostras antes e após o tratamento térmico e a observação dos contornos de grão, possibilitando a determinação de seu tamanho para a condição após tratamento térmico.

As análises de MO foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará, um microscópio marca *Olympus*, modelo GX51, equipado com uma câmera digital modelo SC 180 e auxiliado pelo software de análise de imagens *Analysis Get It*®.

#### 3.2.3.3 Microdureza

Os perfis de microdureza Vickers foram obtidos utilizando um microdurômetro da marca Shimadzu (Figura 25), equipado com um penetrador de diamante e uma carga de 9.807 N, com um tempo de penetração de 15 segundos. Foram realizadas 10 medições de microdureza na escala Vickers (HV) em cada corpo de prova (CP), primeiramente no material como recebido e após tratamento térmico. Posteriormente, os dados foram plotados e foram realizadas análises estatísticas, incluindo a determinação dos valores máximos, mínimos, média, desvio padrão e variância.

Figura 25 – Microdurômetro utilizado neste trabalho.



Elaborada pela autora (2024)

### 3.2.4 Ensaios Mecânicos

A seguir são especificados os procedimentos resistência à tração e impacto charpy ensaiados, foram produzidos três corpos de prova.

#### 3.2.4.1 Ensaio de Tração

Para o levantamento dos valores de resistência à tração e limite de escoamento, foram realizados ensaios de tração em corpos de provas usinados com o material como recebido e material após tratamento térmico. Nesta etapa foi utilizada uma máquina universal da marca EMIC (Figura 26), pertencente ao laboratório de Metrologia do Instituto SESI SENAI de tecnologia em Maracanaú.

Figura 26 – Máquina de tração EMIC.



Elaborada pela autora (2024)

Os procedimentos do ensaio, a geometria dos corpos de prova (CPs) e suas dimensões estiveram em conformidade com a norma ASTM E8/E8M. Os CPs adotados possuíam um perfil retangular e eram de tamanho reduzido, com 5 mm de espessura, 6 mm de largura e um comprimento útil de 32 mm, conforme ilustrado nas Figuras 27 e 28. No total, foram fabricados seis CPs para a realização dos ensaios, que foram conduzidos em triplicata, abrangendo tanto o material no estado original como após o tratamento térmico.

Figura 27 – Corpos de Prova Ensaio Tração.



Elaborada pela autora (2024)

Figura 28 – Corpos de Prova Ensaio Tração Tratados Termicamente.



Elaborada pela autora (2024)

#### 3.2.4.2 Ensaio de Impacto Charpy-V

Os ensaios de impacto Charpy-V foram conduzidos no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM/UFC) utilizando um pêndulo da marca WPM, modelo 400/69/49 (Figura 29), equipado com um martelo de capacidade de 150 J e uma precisão de  $\pm 0,5$  J. Para garantir a correta centralização dos corpos de prova em relação à extremidade de impacto do martelo, utilizou-se uma pinça de posicionamento. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente.

Inicialmente, o material passou por um processo de corte com uma serra fita, resultando em blocos prismáticos com dimensões aproximadas de 7 x 12 x 60 mm. Posteriormente, esses blocos foram submetidos a usinagem para adquirirem a forma dos corpos

Figura 29 – Máquina de ensaio Charpy.

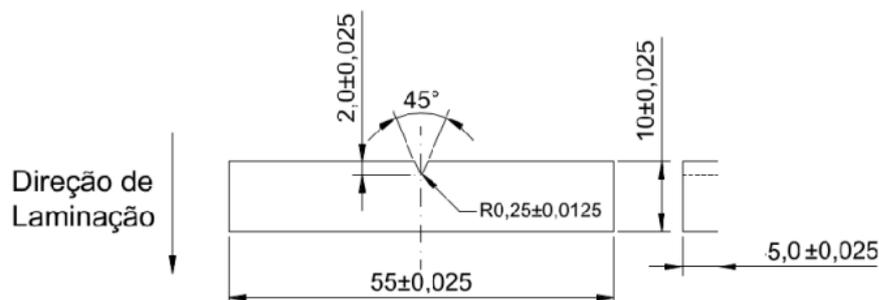


Elaborada pela autora (2024)

de prova (CPs) destinados aos ensaios de Charpy, seguindo as dimensões e tolerâncias estabelecidas pela norma ASTM E23-12c. As dimensões adotadas foram as do "CP" de tamanho reduzido, medindo 5 x 10 x 55 mm, com um entalhe em formato "V".

O entalhe foi elaborado na face com uma largura de 5 mm, seguindo a direção de laminação da chapa na qual os CPs foram cortados. Para uma visualização mais precisa das especificações e dimensões dos CPs, a Figura 30 apresenta um desenho esquemático detalhado.

Figura 30 – Desenho esquemático dos corpos de prova para os ensaios de impacto.



Elaborada pela autora (2024)

Foram confeccionados um total de 6 corpos de prova (CPs) conforme Figura 31, dos quais 3 foram submetidos a um tratamento térmico para possibilitar a realização dos ensaios e, assim, comparar os resultados de tenacidade do material antes e após o tratamento térmico, Figura 32. Após a conclusão dessa etapa, todos os CPs foram submetidos a uma verificação das suas dimensões utilizando um paquímetro Mitutoyo, que possui uma resolução de 0,02 mm e foi calibrado de acordo com as diretrizes da norma NBR NM 216.

Figura 31 – Corpos de Prova Ensaio Charpy das amostras não tratadas.



Elaborada pela autora (2024)

Figura 32 – Corpos de Prova Ensaio Charpy das amostras tratadas termicamente.



Elaborada pela autora (2024)

### 3.2.5 Ensaios Eletroquímicos de corrosão

Para os ensaios eletroquímicos, foram fabricados corpos de prova do material como recebido e tratado termicamente. As amostras foram cortadas e embutidas à frio em resina epóxi, posteriormente, os corpos de prova foram pressionados contra um fio de cobre, visando estabelecer um contato elétrico eficaz entre eles e o *plug* conectado ao potenciostato. Em seguida, foram submetidos a um processo de lixamento, utilizando lixas de carbetto de silício com granulometria 100, 200, 400 e 600. Posteriormente, foram submetidos a uma lavagem em água corrente, seguida de uma aplicação de álcool etílico por aspersão e secagem com um jato de ar quente. Para evitar contatos elétricos, as bordas dos corpos de prova foram revestidas com esmalte, resultando em uma área exposta média de aproximadamente 70 mm<sup>2</sup>.

Os testes eletroquímicos foram realizados em triplicata no Laboratório de Análise de Falha (LIAF) a fim de garantir a uniformidade dos resultados. Utilizou-se uma solução composta por 3,5% de cloreto de sódio em massa (NaCl 0,6 mol/L), com o intuito de simular o ambiente litorâneo, onde os aerogeradores são geralmente instalados.

Uma célula eletroquímica de três eletrodos (Figura 33) foi empregada, consistindo em um eletrodo de referência prata/cloreto de prata ( $Ag_{(s)}/AgCl_{(s)}/Cl_{(saturado)}$ ), um contra

eletrodo de platina em formato de tela ,com área superficial 3x a do eletrodo de trabalho, e o próprio corpo de prova do material em análise, funcionando como o eletrodo de trabalho.

Figura 33 – Célula Eletroquímica.



Elaborada pela autora (2024)

Depois de preparados, os corpos de prova passaram por uma série de testes que incluiu a medição do potencial de circuito aberto (OCP), a realização de ensaios de Polarização Potenciodinâmica e a aplicação da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), conforme explicado a seguir.

#### 3.2.5.1 Potencial de Circuito Aberto

A obtenção das medições de potencial de circuito aberto (OCP) foi realizada com o auxílio de um potenciostato/galvanostato da Metrohm modelo (AUTOLAB, modelo PGSTAT 128N) (Figura 34), operado por meio do software NOVA ® 2.1.5, conectado a um microcomputador que realizou o controle do teste e coletou os resultados.

Para realizar o ensaio de Potencial de Circuito Aberto (OCP), iniciou-se medindo o OCP da amostra em relação ao eletrodo de referência. Esse processo envolveu um período de 90 minutos para permitir que a interface entre o metal e a solução alcançasse uma condição estacionária, onde o valor do OCP permaneceu constante ou apresentou variações mínimas. Essas medições foram conduzidas expondo a superfície do corpo de prova a uma solução de 3,5% de  $NaCl$  a temperatura ambiente, aproximadamente  $25\text{ }^{\circ}C$ , durante um período de 90 minutos (5400 s). A célula eletroquímica consiste em um corpo de prova como eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência  $Ag_{(s)}/AgCl_{(s)}/Cl_{(saturado)}$ .

Figura 34 – Bancada de testes para os ensaios eletroquímicos: Autolab PGSTAT 128N.



Elaborada pela autora (2024)

### 3.2.5.2 Polarização Potenciodinâmica Cíclica

Para realizarmos os testes de Polarização Potenciodinâmica Cíclica, foi utilizado um potenciostato mencionado anteriormente no ensaio de OCP, conectado a um microcomputador controlado pelo programa NOVA<sup>®</sup> que realizou o controle do teste e coletou os resultados. A curva de polarização foi gerada através da varredura, que começou a partir do Potencial de circuito aberto (OCP) e avançou até atingir o valor máximo de corrente de 1 mA, onde irá iniciar o processo de reversão da varredura de potencial. A taxa de varredura adotada no experimento foi de 1 mV/s.

Os corpos de prova logo depois de preparados foram lavadas com água destilada e em seguida, foram imersas na solução do teste, de 3,5% de *NaCl*, iniciando assim a polarização partindo do potencial de circuito aberto (ou de corrosão) após um tempo de estabilização de 90 minutos (5400s), realizando varredura contínua e ascendente do potencial, com uma velocidade de 1 mV/s. Este ensaio foi realizado em triplicata nas amostras como recebido e após tratamento térmico.

### 3.2.5.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

Este método foi aplicado pois é capaz de estudar as reações de corrosão, medindo suas taxas, utilizando-se de pequenos sinais, ou seja, não perturbando as propriedades do eletrodo, determinando a resistência de polarização e a capacitância da dupla camada do sistema, modelado por um circuito capacitivo (WOLYNEC, 2003).

Os testes de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foram realizados após estabilização do potencial aplicado por 90 minutos depois de imerso na solução. As medidas de impedância eletroquímica foram realizadas em uma faixa de frequência de 40 kHz a -6 mHz, no potencial do (OCP), com perturbação sinusoidal de 10 mV (rms) sobre o potencial de circuito aberto e taxa de obtenção de dados de 51 pontos, em temperatura

ambiente (25 °C).

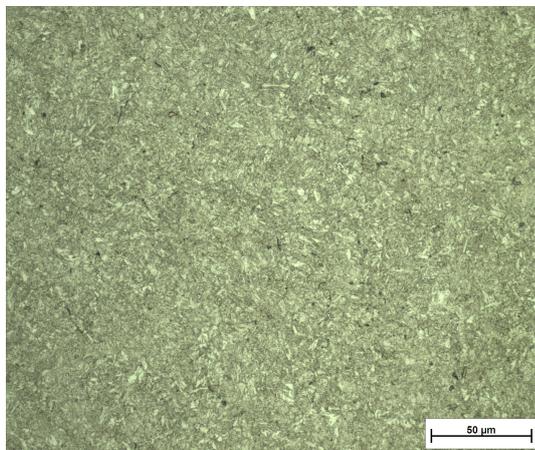
Foram desenvolvidos os diagramas de Nyquist e de Bode por meio de uma varredura de frequências utilizando os 51 pontos obtidos. Com a preocupação de se evitar perturbações externas que poderiam interferir no sistema, utilizou-se a gaiola de Faraday nesses testes. Uma vez obtidos os respectivos diagramas de Nyquist, extrapolaram-se as semicircunferências correspondentes para obtenção da resistência ao processo de transferência de carga da superfície eletródica, da resistência de polarização e a capacitância da camada de passivação.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Caracterização microestrutural

Para analisar as características microestruturais das amostras do material como recebido foi realizada a sua metalografia. As imagens obtidas, por meio da microscopia óptica, podem ser observadas na Figura 35.

Figura 35 – Metalografia do Corpo de prova do material como recebido (500x).

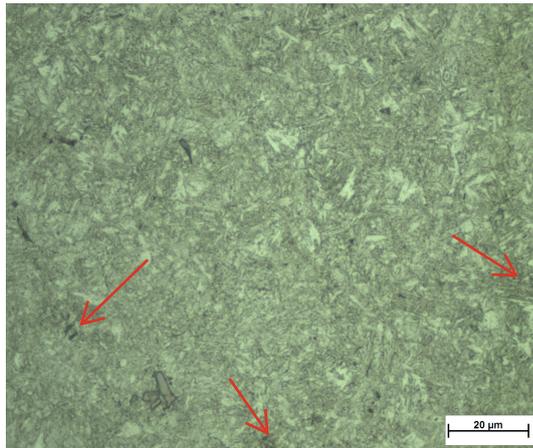


Elaborada pela autora (2024)

A imagem da Figura 35, mostra uma microestrutura constituída de ferrita com uma granulação muito pequena e levemente alongada. É possível que também exista perlita, algo característico de um aço hipoeutetóide, como por exemplo o aço SAE 4140, quando normalizado, conforme indicado no trabalho de Totik (2005), porém nesta imagem não foi possível identifica-la. A Figura 36 apresenta essa característica com maiores detalhes, onde pode-se constatar a morfologia alongada dos grãos e subgrãos. Também observa-se, indicadas por setas, o que pode vir a ser regiões com a presença de perlita, conforme comentário anterior.

Em um aço hipoeutetóide, a ferrita é uma fase de ferro puro com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) mais macia e com menos resistência mecânica nos aços. Devido a sua estrutura cristalina aberta e baixa densidade de empacotamento, o arranjo os átomos de ferro na ferrita (CCC) estão relativamente distantes uns dos outros em comparação com outras estruturas cristalinas mais densas. Já a perlita é uma estrutura lamelar, sua dureza é maior que a da ferrita devido à presença de cementita, que é um constituinte duro (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

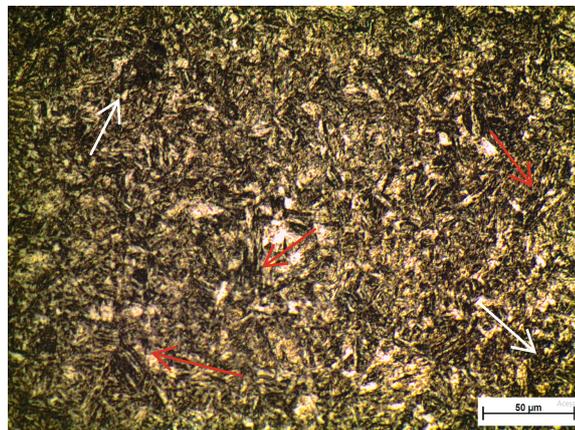
Figura 36 – Metalografia do Corpo de prova do material como recebido (1000x).



Elaborada pela autora (2024)

A Figura 37 apresenta as características, após o tratamento térmico de têmpera e revenimento, de uma possível martensita indicada por setas vermelhas, com morfologia de ripas. Também observa-se regiões escuras, indicadas por setas brancas, com a possível presença de perlita, que pode ter se formado a partir da decomposição da martensita no tratamento de revenimento. Além das fases observadas, há uma suspeita de presença de austenita retida localizadas nas regiões claras.

Figura 37 – Metalografia do Corpo de prova do material temperado e revenido (500x).



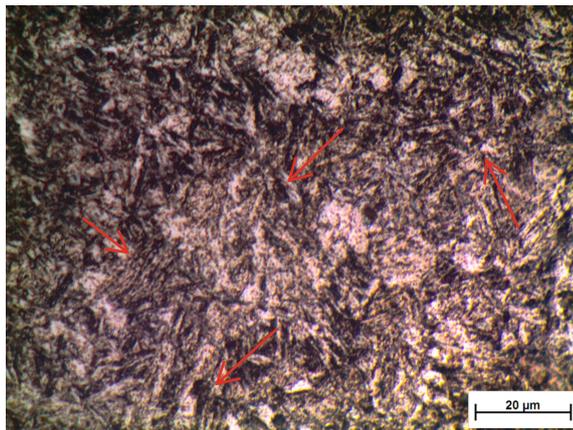
Elaborada pela autora (2024)

Segundo Hill (1980), após a têmpera, além de formar a fase martensítica, inevitavelmente acaba tendo também a estrutura metaestável austenítica à temperatura ambiente, chamada de austenita retida. Com o aquecimento do revenido, existe a tendência dessa fase em se transformar em ferrita e cementita, porém sua presença não pode ser evidenciada pela microscopia óptica.

Como o revenido foi mantido por 40 minutos a 390 °C, seria possível a manutenção da microestrutura martensítica, porém nessa condição de revenimento, com um expressivo alívio das tensões internas acompanhado de diminuição de dureza.

A Figura 38 detalha, com uma maior ampliação, a possível estrutura martensítica com uma geometria alongada na forma de ripas, porém essa hipótese teria que ser confirmada através de imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) ou Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET).

Figura 38 – Metalografia do Corpo de prova do material temperado e revenido (1000x).



Elaborada pela autora (2024)

## 4.2 Ensaaios Mecânicos

### 4.2.1 Ensaio de microdureza Vickers

Para avaliar a influência dos ensaios de têmpera e revenimento na dureza, comparou-se a microdureza das amostras como recebida com as que sofreram tratamento térmico. As Tabelas 3 e 4 apresentam uma análise da Microdureza Vickers obtida para as amostras em cada uma das condições desse estudo.

Tabela 3 – Análise estatística para a dureza do material como recebido.

<b>Análise</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Máximo</b>	405	HV
<b>Mínimo</b>	351	HV
<b>Média</b>	370	HV

Com base nos dados apresentados nas Tabelas 3 e 4, verifica-se que a amostra, após o tratamento térmico, exibiu uma maior dureza. Isso está em conformidade com a expectativa de formação da microestrutura martensítica durante o processo térmico, resultando em um aumento da dureza devido à estrutura cristalina única da martensita, formada pelo resfriamento abrupto a partir da temperatura de austenização mais elevada.

Tabela 4 – Análise estatística para a dureza do material tratado termicamente.

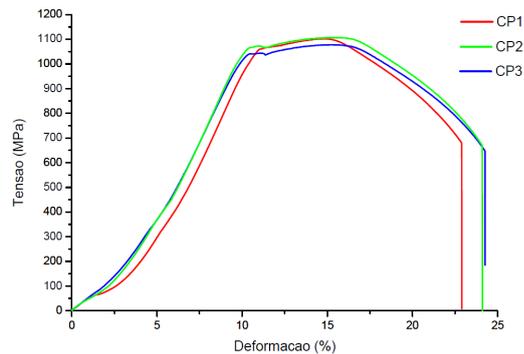
Análise	Valor	Unidade
Máximo	511	HV
Mínimo	464	HV
Média	463	HV

Os resultados da microdureza evidenciam que o material, em sua condição original, foi submetido a um tratamento térmico de têmpera. No entanto, é provável que o revenimento tenha ocorrido a temperaturas mais elevadas, resultando em uma dureza menor quando comparadas ao tratamento térmico subsequente realizado no contexto deste estudo.

#### 4.2.2 Ensaio de Tração

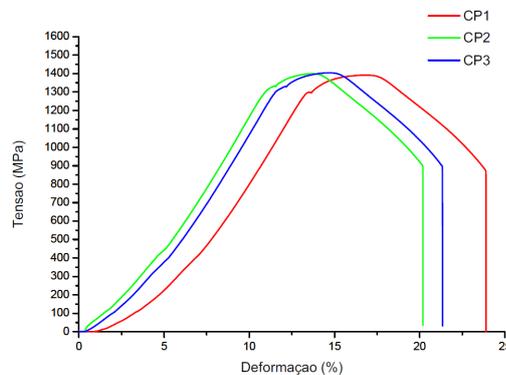
Os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova como recebido e temperado e revenido são mostrados nas Figuras 39 e 40, respectivamente.

Figura 39 – Gráfico Tensão x Deformação das amostras como recebidas.



Elaborada pela autora (2024)

Figura 40 – Gráfico Tensão x Deformação das amostras temperadas e revenidas.



Elaborada pela autora (2024)

A partir da análise dos gráficos, é possível verificar a alteração da resposta dos corpos de provas como recebido para os corpos de provas temperados e revenidos do aço testado, quando submetidos ao ensaio de tração, de forma a aumentar sua resistência.

Para o material na condição inicial, o Limite de Resistência a Tração (LRT) foi de 1050 MPa, já para os corpos de provas temperados e revenidos foi observado o valor de 1400 MPa, o que representa um aumento de 33,3% no valor de LRT.

Comparando o resultado obtido para o material estudado com o do aço de composição semelhante geralmente empregue na aplicação em estudo, o aço AISI 4140, é observado um maior valor de LRT para o aço estudado. De acordo com dados da fornecedora de aços Arcelormittal (2020) o resultado encontra-se dentro dos parâmetros, ficando acima do valor especificado para limite de resistência à tração de 862 MPa. Já no trabalho de Turatti (2017), obteve um valor de 833,96 MPa para resistência à tração. Confrontando com os resultados obtidos no fabricante e na literatura, percebe-se que o valor da resistência à tração ficou superior a essa medição, satisfazendo assim as condições necessárias.

### 4.2.3 Ensaio de Impacto Charpy

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios de energia absorvida obtidos pela média da triplicata em cada condição do material, como recebido e após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

Tabela 5 – Energia absorvida média.

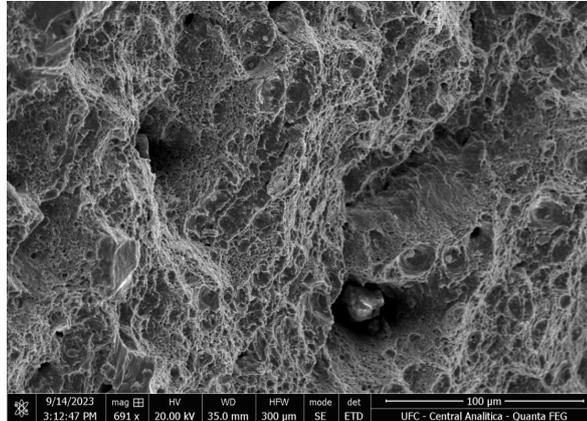
<b>Aço</b>	<b>Valor médio de Energia absorvida (J)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Como recebido</b>	53,6	6,31
<b>Após tratamento térmico</b>	37,9	4,08

Ao analisar a Tabela 5, pôde-se observar uma diminuição de 29% na energia absorvida no metal após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento do aço 4140. Esse processo deve-se à formação da microestrutura de martensita revenida, como foi visto na seção 4.2.

A seguir são apresentadas e analisadas as superfícies de fratura dos corpos de prova do ensaio Charpy nas duas amostras. A Figura 41 apresenta a superfície de fratura da amostra não tratada, e pode-se constatar a predominância de dimples, indicando um processo de fratura dúctil. Essa constatação vai de encontro aos resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy, que indicaram valores da ordem de 55 J, o quê corrobora com o modo de fratura. Apesar das evidências de fratura dúctil, a Figura também contém regiões

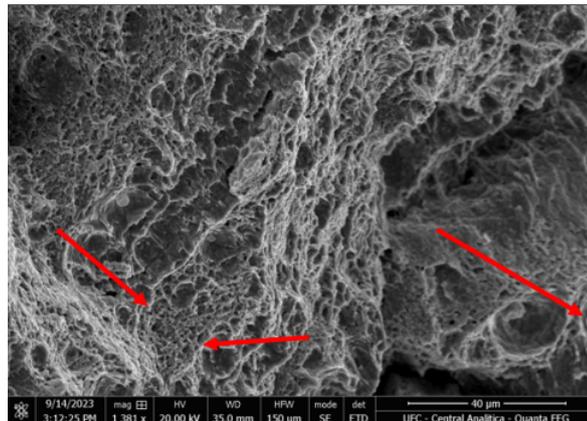
com presença de facetas de clivagem, no entanto são áreas menores, conforme indicado na Figura 42 através de setas.

Figura 41 – Superfície de fratura da amostra não tratada, com predominância de dimples.



Elaborada pela autora (2024)

Figura 42 – Superfície de fratura da amostra não tratada, com presença de facetas de clivagem.

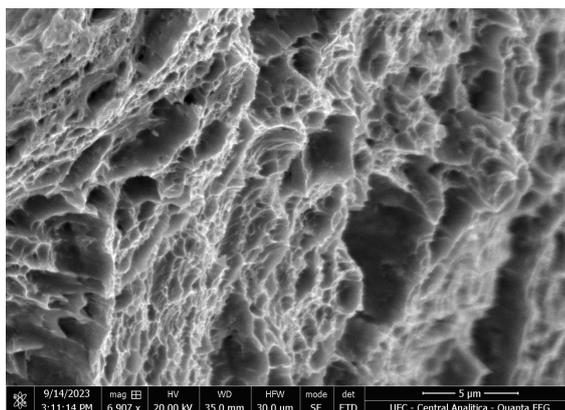


Elaborada pela autora (2024)

A Figura 43 apresenta basicamente as mesmas características comentadas na figura anterior, ou seja, predominância de dimples com presença em menores áreas de clivagem.

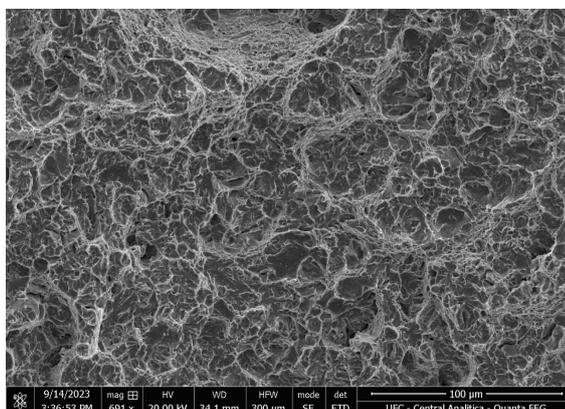
Por outro lado as amostras Tratadas Termicamente, conforme Figura 44 apresentaram fortes características de um processo de fratura frágil. Esta observação pode ser reforçada não só pela predominância de facetas de clivagem, mas também pelo resultado do ensaio de impacto Charpy, da ordem de 39 J. Diferente das figuras anteriores referentes à amostra não tratada que se observou um misto dos tipos de fratura, com pequenas áreas de planos de clivagem, aqui não foi presenciado regiões com dimples, mas apenas clivagem, que são destacadas por setas na Figura 45.

Figura 43 – Superfície de fratura da amostra não tratada.



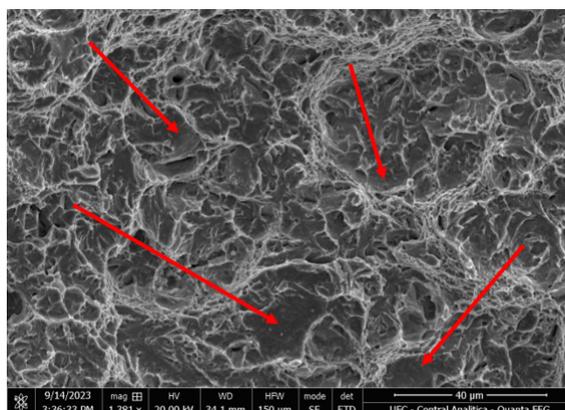
Elaborada pela autora (2024)

Figura 44 – Superfície de fratura da amostra tratada termicamente.



Elaborada pela autora (2024)

Figura 45 – Superfície de fratura da amostra tratada termicamente, indicando a presença das facetas de clivagem.

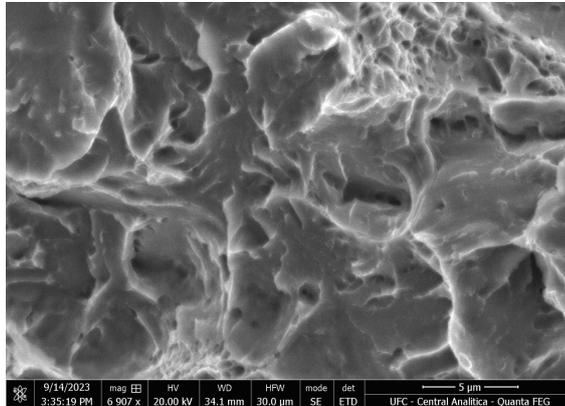


Elaborada pela autora (2024)

Com uma maior ampliação, a Figura 46 mostra de forma mais clara e com detalhes as facetas de clivagem, além é claro, da ausência de quaisquer características de fratura

dúctil.

Figura 46 – Superfície de fratura da amostra tratada termicamente com a ampliação de 6907x.



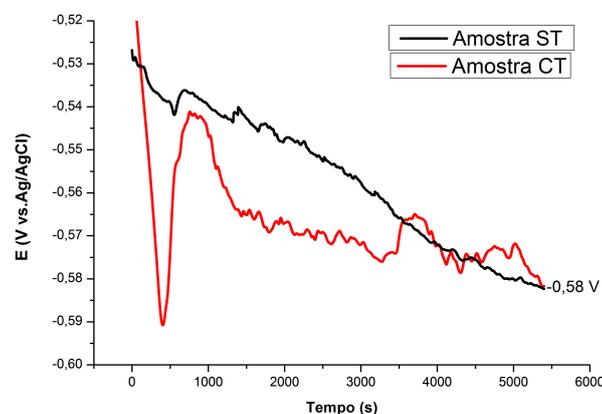
Elaborada pela autora (2024)

## 4.3 Ensaios de Corrosão

### 4.3.1 Potencial de Circuito Aberto (OCP)

A Figura 47 mostra a variação do potencial de circuito aberto (OCP) em função do tempo para a liga estudada, imersa em solução de 3,5% NaCl, na condição como recebida e após o tratamento térmico. Todos os testes foram realizados em triplicata para cada condição. Além disso, o período de análise foi de 1 hora e 30 minutos de ensaio à temperatura ambiente ( $\approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Figura 47 – Gráficos dos ensaios de OCP para a liga estudada em solução de NaCl 0,1 mol/L a temperatura ambiente na condição (a) como recebida e (b) tratada termicamente.



Elaborada pela autora (2024)

Pela Figura 47 é possível observar que, em ambas as condições, os valores de OCP evoluem para potenciais praticamente constantes para um intervalo de tempo de aproximadamente 90 minutos indicando, teoricamente, a estabilização cinética e termodinâmica dos processos eletródicos (REIS, 2015).

### 4.3.2 Polarização Potenciodinâmica Cíclica (PPC)

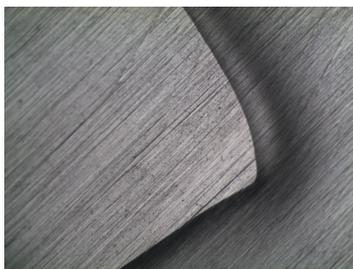
Nas Figuras 48 e 49 é possível visualizar fotomicrografias da superfície da liga em ambas as condições de estudo, antes do ensaio de PPC. Como pode ser observado nas Figuras 48 e 49, a superfície das amostras antes do ensaio de PPC, em ambas as condições testadas, não apresenta produto de corrosão.

Figura 48 – MO (50x) da liga, na condição como recebida, antes do ensaio de PPC.



Elaborada pela autora (2024)

Figura 49 – MO (50x) da liga, na condição tratada termicamente, antes do ensaio de PPC

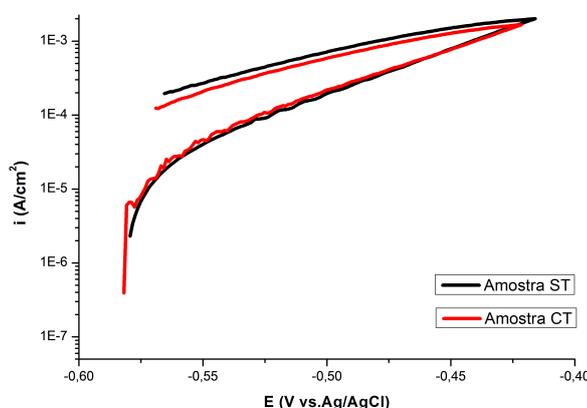


Elaborada pela autora (2024)

Os ensaios de PPC foram realizados em solução aquosa de 3,5% NaCl e os resultados são mostrados na Figura 17.

Através da Figura 50 pode-se observar que, em ambas as condições de teste, a passivação da camada não foi efetiva, uma vez que a densidade de corrente na região de passivação é elevada. Este fato deve-se provavelmente à presença de precipitados, ocasionando uma diminuição do teor de Cr nas regiões vizinhas, promovendo pontos ou regiões empobrecidas de Cr susceptíveis a corrosão localizada (KIM et al., 2011).

Figura 50 – Gráfico de polarização da liga nas condições como recebida e tratada termicamente



Elaborada pela autora (2024)

Foi observado também que a liga mostrou uma extensa área de histerese relacionada à corrosão localizada, além do mais, não ocorreu o cruzamento das linhas de polarização. Com isto, temos que, nas condições estudadas, esta liga não apresenta um potencial de proteção, ou seja, não há um valor de potencial cujo, abaixo deste valor, pode ser afirmado que não haverá quebra da película passiva ou sua não regeneração.

Ainda na reversão potenciodinâmica, o ciclo de histerese positivo foi observado para as duas condições estudadas, indicando que a repassivação do filme passivo não ocorreu. Assim, pode-se afirmar que houve a formação de uma corrosão localizada, quando o potencial é varrido no sentido negativo (REIS, 2015).

Pelo ensaio de PPC, não foi possível medir o potencial de pite, uma vez que, não ocorreu a passivação da camada de proteção, ou seja, devido à alta densidade de corrente que indica que ocorre um processo corrosivo e no final com a rápida elevação da densidade de corrente tem-se provavelmente a reação de evolução de oxigênio (REIS, 2015).

Ao comparar a liga nas condições como recebida e após o tratamento térmico, é observado que a liga tratada apresenta densidades de corrente ligeiramente inferiores, contudo, uma reversão potenciodinâmica em valores de potencial menos nobres.

Assim, analisando os resultados obtidos no ensaio de PPC, é verificado que a aplicação dos ensaios térmicos de têmpera e revenimento, apesar do aumento da energia interna no estado de tratada termicamente, não resultou em um aumento da reatividade química do material, obtendo resultados eletroquímicos semelhantes.

Com o intuito de visualizar a formação do produto corrosivo na superfície do material, foram obtidas fotomicrografias por meio de microscopia óptica. As Figuras 51 e 52 apresentam a superfície das amostras após o ensaio de PPC para ambas as condições

em estudo.

Figura 51 – MO (50x) da liga, na condição como recebida, depois do ensaio de PPC



Elaborada pela autora (2024)

Figura 52 – MO (50x) da liga, na condição tratada termicamente, depois do ensaio de PPC



Elaborada pela autora (2024)

Nas Figuras 51 e 52 é possível verificar a formação de corrosão localizada na região mostrada nas Figuras 48 e 49. Com isto, tem-se que este resultado de MO está coerente com os resultados eletroquímicos obtidos.

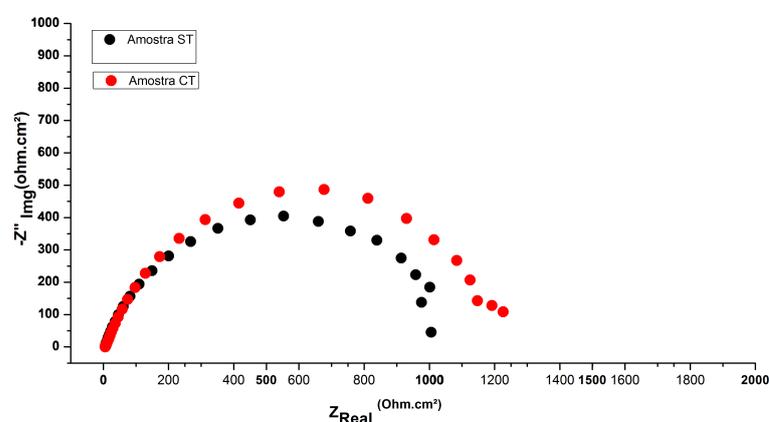
#### 4.3.2.1 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

As medidas de impedância eletroquímica foram realizadas no Potencial de Circuito Aberto (OCP), utilizando as amostras na condição como recebida e tratadas termicamente em solução de 3,5% NaCl a temperatura ambiente. A Figura 53 mostra os diagramas de Nyquist obtidos após 1800s de imersão.

Pode ser observado na amostra com tratamento térmico, um maior diâmetro do arco capacitivo na região de alta frequência, indicando maior resistência à transferência de carga na interface eletrodo/superfície, ou seja, maior resistência ao processo corrosivo no meio estudado.

A formação de um arco capacitivo indica o comportamento típico do processo de cinética de reação por transferência de carga interface metal/solução eletrolítica, representando os fenômenos da dupla camada elétrica na interface metal/eletrolito, com reação de corrosão do tipo  $Me_{(s)} \rightarrow Me^{n+}_{(aq)} + ne^{-}$ , caracterizado pelo elemento capacitivo interfacial, a capacitância da dupla camada elétrica (BRETT e CHRISTOPHER, 1993).

Figura 53 – Diagramas de Nyquist das amostras como recebida e tratada termicamente após imersão durante 1800s na solução de 3,5% NaCl a temperatura ambiente



Elaborada pela autora (2024)

Ainda nos diagramas da Figura 53, a não observação do segundo arco capacitivo das amostras, pode ser atribuída à dissolução do filme de óxido adsorvido na superfície da matriz metálica, atribuído, por exemplo, à heterogeneidade da superfície rugosa resultante desta dissolução (GIRÃO, 2015), sugerindo que, apesar da formação de uma camada instável, as amostras apresentaram baixa resistência ao processo corrosivo.

Embora estes resultados apresentem uma diferença entre as amostras nas condições estudadas, essa diferença apresenta valores pouco significativos, indicando serem não muito relevantes para compará-las.

## 5 Conclusão

A microestrutura da liga como recebida apresenta a presença de ferrita com uma granulação muito pequena e levemente alongada. É possível que também exista perlita, algo característico de um aço hipoeutetoide. Após o processo dos tratamentos de têmpera e revenimento, é possível observar a presença de uma provável estrutura martensítica com morfologia de ripas. Também observa-se regiões escuras, com a possível presença de perlita, que pode ter se formado a partir da decomposição da martensita no tratamento de revenimento.

Após o processo de têmpera e revenimento, ocorreu um nítido aumento do Limite de Resistência a Tração (LRT). Para as condições estudadas neste trabalho, o LRT da liga, após tratamentos térmicos, obtido foi de 1400 MPa, 350 MPa superior à condição inicial, o que corresponde a um aumento de 33% no valor de LRT.

Já com relação à energia absorvida obtida no ensaio de impacto Charpy, foi observada uma redução para a liga após os tratamentos térmicos. Nesse caso, após a têmpera e revenimento, o aço absorveu uma energia de 37,9 J, o que representa uma diminuição de 29%, quando comparado à condição inicial. Ainda pelo ensaio de impacto Charpy, foi observado que, na amostra não tratada, ocorreu um misto dos tipos de fratura, com pequenas áreas de planos de clivagem. Já nas amostras tratadas termicamente, não foi presenciado regiões com dimples, mas apenas clivagem, caracterizando a fratura frágil.

Pelo ensaio de PPC, foi possível observar que a passivação da camada não foi efetiva, uma vez que a densidade de corrente na região de passivação é elevada e apresenta variação de acordo com o valor de potencial aplicado. Assim, analisando os resultados obtidos no ensaio de PPC, é verificado que a aplicação dos ensaios térmicos de têmpera e revenimento, apesar do aumento da energia interna no estado de tratada termicamente, não resultou em um aumento da reatividade química do material, obtendo resultados eletroquímicos semelhantes.

No ensaio de EIE, foi observado na amostra com tratamento térmico, um maior diâmetro do arco capacitivo, indicando maior resistência à transferência de carga na interface eletrodo/superfície, ou seja, maior resistência ao processo corrosivo no meio estudado. Contudo, apesar das amostras apresentarem uma diferença entre as condições estudadas, essa diferença apresenta valores pouco significativos, indicando serem não muito relevantes para compará-las.

# Referências

- ARCELORMITTAL. **Guia do aco**. 2020. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/pdf/produtos-solucoes/catalogos/catalogo-guia-aco.pdf>>.
- BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. et al. Fundamentals and applications. **Electrochemical Methods**, Wiley New York, v. 2, p. 482, 2001.
- BHANDARI, V. **Design of machine elements third edition**. [S.l.: s.n.], 2020.
- BRYTAN, Z.; NIAGAJ, J. et al. Corrosion studies using potentiodynamic and electrochemical techniques of welded lean duplex stainless steel uns s82441. **Applied Surface Science**, Elsevier, v. 388, p. 160–168, 2016.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Callister’s materials science and engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.
- CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7 edição. **São Paulo: Editora Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais–ABM**, 2005.
- COSTA, A. L. V. da; MEI, P. R. et al. **Aços e ligas especiais**. [S.l.]: Editora Blucher, 2010.
- CUNHA, L. B. da et al. **Elementos de máquinas**. [S.l.]: LTC, 2005.
- EBRAHIMI, S.; GHASSEMI, M. A. Numerical aerodynamics analysis of the of the archimedes screw wind turbine. **Int. J Multidisciplinary Sci & Eng**, p. 12–15, 2018.
- EDITORA, S.-S. **Tratamento térmico dos metais–Da teoria à prática**. [S.l.]: SENAI SENAI Editora, 2018.
- FILHO, D. C. S. **Análise de projetos de montagem de turbinas eólicas**. 2017.
- GAO, J. et al. Investigation of selective corrosion resistance of aged lean duplex stainless steel 2101 by non-destructive electrochemical techniques. **Electrochimica Acta**, Elsevier, v. 54, n. 24, p. 5830–5835, 2009.
- GARCIA, A. **Aerodynamics of wind turbines**. [S.l.]: LTC, 2012.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaios dos materiais**. [S.l.]: Livros Técnicos e científicos, 2000.
- GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. [S.l.]: LTC Editora, 2001.
- GENTIL, V. Corrosão. In: **Corrosao**. [S.l.]: LTC, 2011.
- HANSEN, M. **Aerodynamics of wind turbines**. [S.l.]: Routledge, 2015.
- HILL, R. E. R. **Principios de Metalurgia física**. [S.l.]: Ceca (Compania Editorial Continental), 1980.

- IBERDROLA. **Aerogeradores**. 2024. Disponível em: <[www.iberdrola.com/sustentabilidade/pas-aerogeradores/](http://www.iberdrola.com/sustentabilidade/pas-aerogeradores/)>.
- INDUSTRIA, O. da. **Rotas estratégicas setoriais 2025**. 2023. Disponível em: <<https://www.observatorio.ind.br/prospectiva-e-cooperacao/>>.
- KIM, J. K. et al. New findings on intergranular corrosion mechanism of stabilized stainless steels. **Electrochimica Acta**, Elsevier, v. 56, n. 4, p. 1701–1710, 2011.
- LIAO, D. et al. Fatigue reliability of wind turbines: historical perspectives, recent developments and future prospects. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 200, p. 724–742, 2022.
- MACDONALD, J. R. Impedance spectroscopy. **Annals of biomedical engineering**, Springer, v. 20, n. 3, p. 289–305, 1992.
- MAGNABOSCO, R. Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável uns s31803 (saf 2205). **São Paulo**, 2001.
- MÁRQUEZ, F. P. G. et al. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. **Renewable energy**, Elsevier, v. 46, p. 169–178, 2012.
- NUCCI, J. E. **Comportamento ao impacto dos aços SAE 4140 e SAE 01 sob diferentes condições de tratamento térmico: temperado e revenido (com e sem banho criogênico) e austemperado**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.
- PENG, H. et al. Review of tribological failure analysis and lubrication technology research of wind power bearings. **Polymers**, MDPI, v. 14, n. 15, p. 3041, 2022.
- PINEDO, C. E. **Tratamentos térmicos e superficiais dos aços**. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.
- POTGIETER, J. Influence of  $\sigma$  phase on general and pitting corrosion resistance of saf 2205 duplex stainless steel. **British corrosion journal**, Taylor & Francis, v. 27, n. 3, p. 219–223, 1992.
- PRINCETON, A. Basics of electrochemical impedance spectroscopy: application note ac-1. 2008.
- RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e seu controle**. [S.l.]: Hemus, 2012.
- REIS, F. E. U. **Avaliação das propriedades mecânicas e de resistência a corrosão em ligas modelo de aço inoxidável 25Cr 6Mo 5Ni com e sem adição de Boro. 2015. 135p**. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado Engenharia e Ciência dos Materiais)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- REN, Z. et al. Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 144, p. 110886, 2021.
- RODRIGUES, C. **Avaliação do comportamento mecânico e tribológico de parafuso da classe 10.9 para emprego estrutural. 2015. 120 p**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)–Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy ..., 2015.

- SANTOS, L. L. S. Análise de fadiga de uma pá de turbina eólica submetida a um carregamento simplificado de davenport utilizando a ferramenta computacional ansys. 2022.
- SANTOS, M. R. V. **Estudo dos processos de corrosão e biocorrosão causados por fluidos da indústria do petróleo**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1996. v. 15.
- SHAKERI, I. et al. Effect of manufacturing defects on fatigue life of high strength steel bolts for wind turbines. **Engineering Failure Analysis**, Elsevier, v. 141, p. 106630, 2022.
- SLOOTWEG, J.; KLING, W. The impact of large scale wind power generation on power system oscillations. **Electric power systems research**, Elsevier, v. 67, n. 1, p. 9–20, 2003.
- SOUZA, S. A. D. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. [S.l.]: Editora Blucher, 1982.
- SOUZA, S. A. de. **Composição química dos aços**. [S.l.]: Editora Blucher, 1989.
- STEPHENS, R. I. et al. Influence of cold rolling threads before or after heat treatment on the fatigue resistance of high strength coarse thread bolts for multiple preload conditions. **Journal of ASTM International**, ASTM International, v. 3, n. 3, p. JAI13075, 2005.
- TOTIK, Y. The corrosion behavior of aisi 4140 steel subjected to different heat treatments. **Corrosion Reviews**, De Gruyter, v. 23, n. 4-5-6, p. 379–390, 2005.
- TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment handbook-2 volume set**. [S.l.]: CRC press, 2006.
- TURATTI, E. Avaliação do comportamento do aço sae 4140 submetido a ensaios mecânicos. 2017.
- VOORT, G. F. V. **Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels**. [S.l.]: ASM international, 1991.
- VOORT, G. F. V. et al. Asm handbook. **Metallography and microstructures**, ASM International Materials Park, OH, v. 9, p. 44073–0002, 2004.
- WALTER, G. A review of impedance plot methods used for corrosion performance analysis of painted metals. **Corrosion Science**, Elsevier, v. 26, n. 9, p. 681–703, 1986.
- WILSON, R. E.; LISSAMAN, P. B. Applied aerodynamics of wind power machines. **Renewable Energy**, Routledge, p. Vol3\_71–Vol3\_120, 2018.
- WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão Vol. 49**. [S.l.]: Edusp, 2003.
- ZHENG, T.; CHEN, N.-Z. Time-domain fatigue assessment for blade root bolts of floating offshore wind turbine (fowt). **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 262, p. 112201, 2022.