



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E  
TECNOLOGIA CURSO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**



**INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NO COMPORTAMENTO À  
CORROSÃO DO AÇO 1045**

**ESTEPHANE DIANA FERREIRA PEREIRA**

**São Luís - MA**

**2023**

**ESTEPHANE DIANA FERREIRA PEREIRA**

**INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NO COMPORTAMENTO À  
CORROSÃO DO AÇO 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
coordenação do curso de Engenharia Mecânica  
como requisito para obtenção do título de  
Bacharel(a) em Engenharia Mecânica

Orientadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Maria Eliziane Pires de Souza

**São Luís - MA**

**2023**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Pereira, Estephane Diana Ferreira.

INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NO COMPORTAMENTO À  
CORROSÃO DO AÇO 1045 / Estephane Diana Ferreira Pereira. -  
2023.

48 f.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Maria Eliziane Pires de  
Souza.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica,  
Universidade Federal do Maranhão, São Luís-Ma, 2023.

1. Corrosão. 2. Ço SAE 1045. 3. Microestrutura. 4.  
Tratamento térmico. I. Souza, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Maria Eliziane  
Pires de. II. Título.

**ESTEPHANE DIANA FERREIRA PEREIRA**

**INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NO COMPORTAMENTO À  
CORROSÃO DO AÇO 1045**

Trabalho aprovado. São Luís – MA

12 de dezembro de 2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Eliziane Pires de Souza - Orientadora

---

Prof. Dr. Andrei Bavaresco Rezende – UFMA/Engenharia Mecânica

---

Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues – UFMA/Engenharia Mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e saúde, que me permitiu superar as dificuldades e torna possível a realização de mais um sonho.

Agradeço a minha mãe Rosalina Ferreira e família que sempre me incentivam a não desistir e me deram todo carinho e apoio nos momentos difíceis. Me mostraram também a importância do conhecimento e esforço.

Agradeço ao meu namorado Riordan Moraes pelo carinho, paciência, amizade e compreensão. Por acreditar sempre no meu potencial e incentivar meu crescimento profissional.

Aos meus amigos da UFMA, em especial a João Victor Teixeira, Nadia Lypp, Matheus Garcia, Celine Fernandes, Bruna Cristina, Silas Moura, Vinícius Costa, Willame Júnior e João Marcos que contribuíram por meio de conselhos, inspirações, diversão, companheirismo e diversas horas de estudo compartilhadas.

A minha professora e orientadora Dr<sup>a</sup>. Maria Eliziane Pires de Souza por partilhar seus conhecimentos e ajudar na construção do trabalho.

## RESUMO

A corrosão é um processo que pode causar danos estruturais, reduzir a vida útil e impactar negativamente no desempenho de componentes. Ao aplicar tratamentos térmicos como têmpera, revenimento, recozimento e normalização é possível modificar a microestrutura dos materiais e conseqüentemente suas características eletroquímicas. O presente trabalho tem como foco estudar os efeitos dos tratamentos térmicos na corrosão do aço com 0,45% de carbono (SAE 1045) e fornecer conhecimentos sobre como melhorar a resistência à corrosão deste material. O estudo envolveu tratamentos térmicos no aço, sendo eles: recozimento, normalização e têmpera seguida de revenimento. Após os tratamentos, as amostras foram avaliadas por metalografia, dureza e ensaios eletroquímicos. A análise metalográfica revelou diferenças nas microestruturas entre as amostras, evidenciando a eficácia dos tratamentos. O ensaio de polarização em solução de NaCl 3,5% indicou que a amostra submetida a têmpera e revenimento apresentou a melhor resistência à corrosão, corroborando com os resultados de Impedância Eletroquímica. Os tratamentos de revenimento e normalização destacaram-se na resistência à corrosão, conforme demonstrado nas análises eletroquímicas, evidenciando um comportamento mais favorável no que diz respeito à corrosão.

**Palavras-chave:** Microestrutura, corrosão, tratamento térmico, aço SAE 1045

## ABSTRACT

Corrosion is a process that can cause structural damage, reduce the lifespan, and negatively impact the performance of components. By applying heat treatments such as quenching, tempering, annealing, and normalization, it is possible to modify the microstructure of materials and consequently their electrochemical characteristics. This study focuses on investigating the effects of heat treatments on the corrosion of 0.45% carbon steel and providing insights into improving the corrosion resistance of this material. The study involved heat treatments on the steel, including quenching and tempering, resulting in modifications to the microstructure and a reduction in the grains of ferrite and cementite, improving hardness. Metallographic analysis revealed differences between the samples, highlighting the effectiveness of the treatments. Polarization testing in a NaCl solution indicated that the sample subjected to quenching and tempering exhibited the best corrosion resistance, supporting impedance data. Tempering and normalization treatments stood out in corrosion resistance, as demonstrated by electrochemical analyses, revealing a more favorable behavior in terms of corrosion.

**Keywords:** Microstructure, corrosion, heat treatment, SAE 1045 steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama ferro-carbono.....	12
Figura 2-Diagrama tratamento de têmpera .....	13
Figura 3 - Diagrama tratamento de têmpera e revenimento .....	15
Figura 4 - Diagrama tratamento de recozimento .....	16
Figura 5 - Diagrama tratamento de normalização .....	17
Figura 6 - Classificação dos tipos de corrosão.....	18
Figura 7 - Corrosão do aço 1045 .....	19
Figura 8 - Curva de polarização .....	21
Figura 9 - Representação esquemática das curvas de Tafel.....	22
Figura 10 - Esquema de célula eletroquímica .....	23
Figura 11 - Diagrama de Nyquist .....	24
Figura 12 - Diagrama de Bode .....	24
Figura 13 - Impressão formata pelo identador.....	25
Figura 14 - Amostras .....	29
Figura 15 - Célula eletroquímica .....	30
Figura 16 - Identações em amostra .....	31
Figura 17 - Metodologia utilizada no trabalho .....	31
Figura 18 - Amostras com ataque de nital 3% a) sem tratamento; b) revenida ; c) recozida; d) normalizada .....	33
Figura 19 - Amostras com ataque de nital 2% e picral 3% a) sem tratamento; b) revenida; c) recozida; d) normalizada.....	35
Figura 20 - Curvas de polarização a) sem tratamento b) revenido c) recozido d) normalizada .....	38
Figura 21 - Média do ensaio de polarização .....	39
Figura 22 - Resultados do ensaio de EIE para as diferentes condições de tratamento (a) diagrama de Nyquist; (b) bode Fase e (Bode Z) .....	41
Figura 23 - Circuito do processo de transferência de cargas .....	42
Figura 24 - Gráfico da relação tratamento térmico x Rct .....	42



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado para ensaio de dureza .....	37
Tabela 2- Parâmetros do ensaio de polarização .....	40

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 JUSTIFICATIVA .....	10
2. OBJETIVOS .....	11
2.1 OBJETIVO GERAL .....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 TÊMPERA.....	13
3.2 RECOZIMENTO.....	15
3.3 NORMALIZAÇÃO.....	16
3.4 CORROSÃO .....	17
3.5 POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA .....	20
3.6 CURVAS DE TAFEL .....	21
3.7 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA .....	22
3.8 DUREZA .....	25
3.9 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
5. RESULTADOS .....	33
5.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL NITAL 3% .....	33
5.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL NITAL 2% E PICRAL 1,2%.....	34
5.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	36
5.4 CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA.....	37
5.5 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE) .....	40
6. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS .....	44

# 1. INTRODUÇÃO

O tratamento térmico é um processo que ocorre no estado sólido e envolve três etapas: aquecimento, manutenção em temperaturas específicas e resfriamento. Seu objetivo é modificar as microestruturas dos metais e ligas, o que, por sua vez, afeta as propriedades mecânicas, magnéticas e elétricas desses materiais. Em resumo, o tratamento térmico é uma técnica utilizada para alterar as características físicas e químicas dos metais e ligas por meio de controle cuidadoso da temperatura (Reed-Hill e Abbaschian, 1994).

O aço 1045 é amplamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos de máquinas, tais como engrenagens, eixos, hastes pinos, peças estruturais como vigas, suportes, bases e também em ferramentas de cortes. Devido a sua crescente demanda no mundo e sua susceptibilidade à ação corrosiva dos meios no qual está exposto, é muito importante conhecer a resistência à corrosão. O valor máximo de dureza do aço 1045 está associado à formação de martensita que é influenciada pelo seu teor de carbono (0,45%). A ausência de elementos de liga altera a transformação da estrutura cristalina da austenita para ferrita/perlita (Guedes, 2017).

Os tratamentos térmicos que envolvem a transformação da austenita são amplamente utilizados na indústria para modificar as propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais metálicos. Um deles é a têmpera, no qual o material austenítico é resfriado rapidamente para induzir a formação de uma estrutura martensítica de alta dureza. O processo é seguido por tratamento de revenido, no qual material temperado é aquecido a uma temperatura abaixo da linha crítica inferior para reduzir a fragilidade e melhorar a tenacidade. Outro tratamento é o recozimento, no qual o material é aquecido acima da temperatura de transformação da austenita e resfriado lentamente para aliviar tensões, aumentar a ductilidade e reduzir a dureza. A normalização, por sua vez, é um tratamento similar ao recozimento, mas com resfriamento em ar ambiente, utilizado para obter uma microestrutura mais uniforme, refinada (Callister, 2013).

Para os aços, os tratamentos térmicos mais empregados são aqueles que envolvem as transformações da austenita. Dentre eles estão a têmpera e revenimento, recozimento e normalização.

A fase martensítica ocorre predominantemente por meio de tratamento térmico de têmpera, cujo propósito principal é incrementar a dureza e resistência mecânica do material. Este processo térmico é comumente aplicado em aços que possuem médio e elevado teor de carbono, promovendo aumento significativo na dureza (Colpaerte, 2008).

Corrosão é um processo de deterioração de materiais que pode ocorrer devido à ação química ou eletroquímica do ambiente, muitas vezes associado a esforços mecânicos. Esse fenômeno pode resultar em modificações indesejáveis, como desgaste, alterações químicas ou mudanças estruturais, o que torna o material inadequado para sua finalidade original. Em resumo, a corrosão é um processo de degradação que pode causar danos significativos aos materiais em uso (Gentil, 2011).

Dentre as técnicas eletroquímicas disponíveis, aquelas mais comumente empregadas na avaliação da corrosão incluem os métodos de extrapolação das retas de Tafel e a medida da resistência à polarização linear. Ambas as abordagens possibilitam a determinação e avaliação da resistência à corrosão de materiais, sendo amplamente reconhecidas e utilizadas na prática (Porto, 2017). A partir do método de Tafel é possível determinar calcular a densidade de corrente de corrosão e resistência à polarização.

Segundo Wolyneec (2013) o propósito da técnica de polarização linear é mensurar a resistência à oxidação de um material quando exposto a um meio corrosivo específico. A resistência à polarização determinada por esse método está correlacionada com a taxa de corrosão generalizada para metais no potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O tratamento térmico leva a alterações na microestrutura de uma peça, o que pode afetar a sua resistência à corrosão. Por exemplo, o aquecimento da peça pode causar a formação de diferentes fases em sua estrutura, como precipitados ou fases intermetálicas, que podem influenciar na sua resistência à corrosão. Além disso, o resfriamento rápido da peça pode levar à formação de tensões residuais, que também podem afetar a sua resistência à corrosão. Sendo assim, no trabalho aqui proposto,

pretende-se fazer a análise microestrutural do aço SAE 1045 após diferentes tratamentos térmicos bem como testes de corrosão de forma a avaliar o efeito desses tratamentos na corrosão em um meio salino e ensaio de dureza buscando correlacionar aspectos microestruturais e comportamentais do aço, oferecendo parâmetros sobre suas propriedades e resistência frente a processos corrosivos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Análise de alterações microestruturais, de corrosão e dureza em amostras de aço SAE 1045 após tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, recozimento e normalização.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Realizar têmpera e revenimento

Realizar recozimento

Realizar normalização

Visualizar a microestrutura das amostras antes e após os tratamentos térmicos

Realizar ensaios eletroquímicos em meio salino

Realizar ensaio de dureza

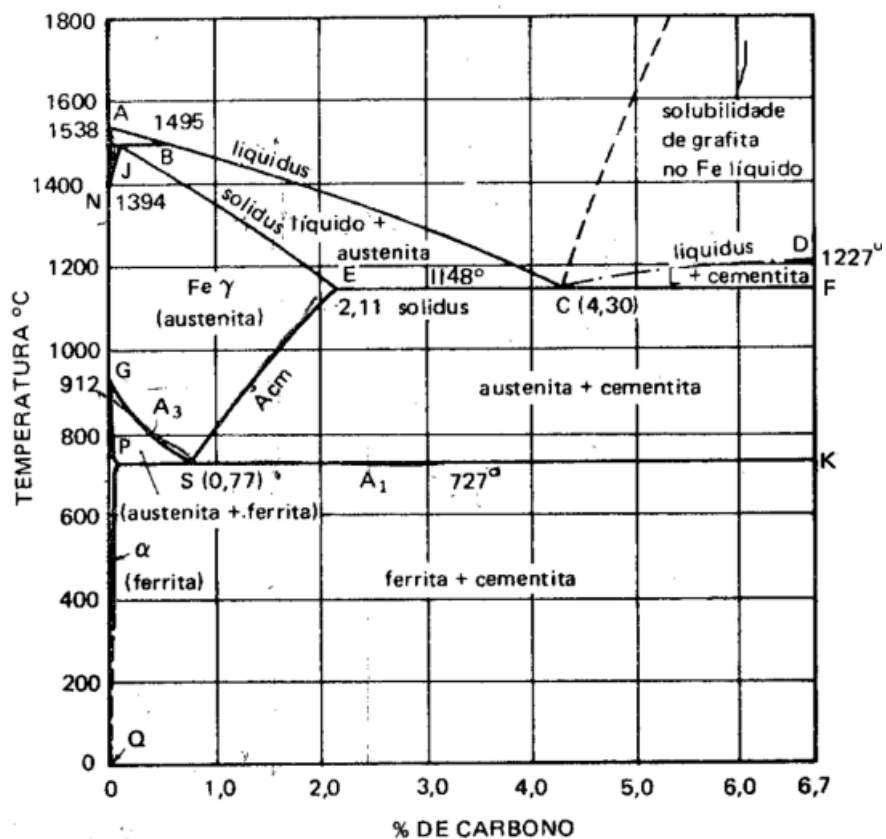
Avaliar o efeito dos tratamentos térmicos na corrosão

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O diagrama de ferro carbono é uma representação gráfica que descreve as diferentes fases que podem existir em uma liga de ferro e carbono em equilíbrio térmico. Tal diagrama é fundamental para entender o comportamento das ligas de ferro-carbono durante processos térmicos, como têmpera, recozimento, revenimento e normalização(Dutra,s.d).

Na Figura 1 a linha  $A_1$  indica a reação eutetóide  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{cementita}$ , na linha  $A_2$  transformação magnética do ferro, linha  $A_3$  temperatura de transformação de austenita para cementita  $\gamma \rightarrow \alpha$  e linha  $A_{cm}$  temperatura de transformação  $\gamma \rightarrow \text{cementita}$

Figura 1- Diagrama ferro-carbono



Fonte: (Dutra,s.d)

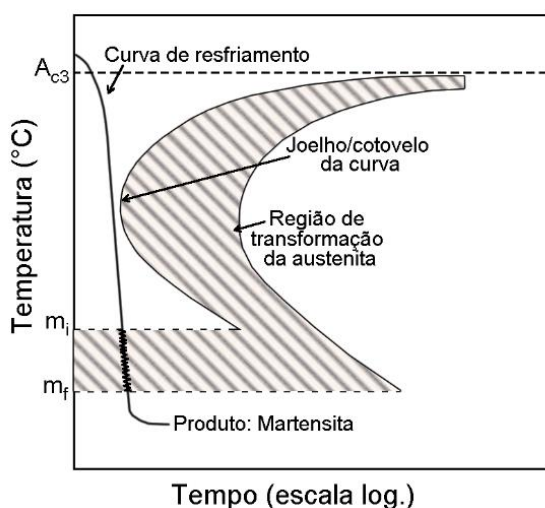
### 3.1 TÊMPERA

O tratamento de têmpera consiste em aquecer a peça em um forno a uma temperatura de aproximadamente 50 °C acima do limite superior da zona crítica ( $A_3$ ) conforme Figura 1 mantendo o tempo suficiente para que toda a estrutura esfrie muito rapidamente (em água, salmoura ou óleo). O objetivo dessa têmpera é obter a estrutura martensítica aumentando sua dureza. Para que isso ocorra se faz necessário que a curva de resfriamento caia rapidamente evitando a formação de fases indesejadas como perlita e ferrita Scheidemantel, 2014). A taxa de resfriamento para aço SAE 1045 pode variar entre as temperaturas de 750 °C à 900 °C (Handbook, 2004 - adaptado).

A têmpera é amplamente reconhecida como um dos tratamentos térmicos mais importantes na indústria, pois, combinada com o revenimento, permite o uso de peças de maior responsabilidade em aplicações críticas, tanto na indústria de transporte quanto na mecânica, entre outros setores (Chiaverini, 2003).

Na Figura 2 a curva de resfriamento deve passar à esquerda do cotovelo da curva em C evitando a transformação em austenita (Chiaverini, 2008).

Figura 2-Diagrama tratamento de têmpera



Fonte: (FATEC SERTÃOZINHO, 2022)

Durante a têmpera, o resfriamento rápido impede que o carbono dissolvido na austenita se difunda para fora dessa fase durante a transformação martensítica. Essa transformação ocorre instantaneamente por um mecanismo de cisalhamento, levando à formação de uma estrutura cristalina tetragonal, conhecida como fase martensítica. A deformação microestrutural resultante dessa transformação gera tensões internas elevadas na estrutura, o que contribui para o aumento significativo da dureza e resistência à tração do aço temperado. Resultam da têmpera a redução de ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição) e tenacidade que são eliminados pelo revenimento (Chiaverini, 2008 - adaptado).

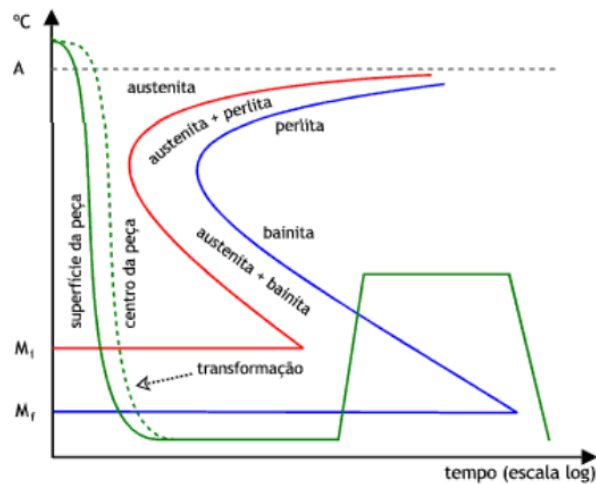
Revenimento é um tratamento térmico complementar que provoca melhorias nas propriedades de materiais endurecidos, também conhecido como alívio de tensões, corrigindo dureza, fragilidade, aumentando a ductilidade e resistência ao choque. Consiste em aquecer o aço a uma temperatura sempre abaixo da zona crítica e tal temperatura é escolhida conforme as propriedades mecânicas que pretende ser obtidas, mas respeitando os limites do tipo de aço. Para o aço 1045 tal temperatura pode variar de 10 °C à 700 °C (Handbook, 2004 - adaptado e Usiminas,s.d.).

À medida que a temperatura do material se aproxima da linha crítica, o efeito de revenimento em sua estrutura aumenta, resultando em um material temperado com maior tenacidade (Aços Gerdau, 2019)

Durante processo de revenimento, a temperatura desempenha um papel crucial no comportamento térmico, a primeira mudança é na estrutura cristalina, com a transformação da martensita tetragonal em martensita cúbica, alterando propriedades mecânicas, outra mudança é na segregação de carbono, ou seja, na redistribuição do carbono nos contornos de grãos ou outras regiões microestruturais, na decomposição da austenita retida, visto que durante o revenimento a mesma pode se decompor em outras fases, a precipitação de carbeto, recuperação da matriz ferrítica e a recristalização da matriz ferrítica (Smith,1993). A Figura 3 representa a transformação de um tratamento de revenimento de aço carbono.



Figura 3 - Diagrama tratamento de têmpera e revenimento



Fonte : (FUKUMASU, 2016)

### 3.2 RECOZIMENTO

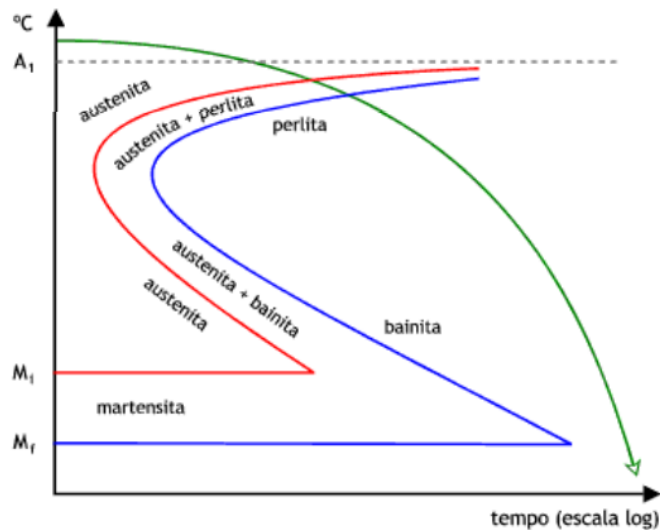
O recozimento é uma técnica de tratamento térmico que visa melhorar as propriedades mecânicas e estruturais de um material. Consiste em aquecer o material até uma determinada temperatura e resfriá-lo lentamente. O processo remove as tensões internas, aumenta a ductilidade, controla o tamanho dos grãos e produz uma microestrutura definida, tornando o material mais adequado para sua aplicação final (Chiaverini, 1986).

O recozimento total ou pleno consiste em aquecer o aço acima da zona crítica (temperatura de austenitização) durante o tempo necessário para se obter solução de carbono ou dos elementos de liga no ferro gama e posteriormente é feito um resfriamento lento com o forno desligado (Santos, 2021).

Para o aço 1045 tal temperatura pode variar de 790 °C à 870 °C (Handbook, 2004 - adaptado e Chiaverini, 2008)

A Figura 4 representa o diagrama de tratamento e nele é possível observar a composição microestrutural após o recozimento, sendo ela composta por perlita e ferrita.

Figura 4 - Diagrama tratamento de recozimento



Fonte: (FUKUMASU, 2016)

O processo de recozimento é bastante praticado a nível laboratorial e industrial com o objetivo de melhorar propriedades de ligas e aço carbono, tal tratamento térmico pode ser justificado pela facilidade de produzir modificações microestruturais permanecendo inalterado sua composição química, garantindo redução do alívio de tensão interna resultante de processos anteriores como laminação a frio ou soldagem. A estrutura cristalina mais homogênea e refinada resultante do recozimento pode melhorar a resistência à corrosão, uma vez que a corrosão tende a se propagar mais facilmente em regiões com descontinuidades estruturais (Viana, 2019).

### 3.3 NORMALIZAÇÃO

A normalização é um processo que envolve o aquecimento de uma liga de ferro até atingir uma temperatura acima da região crítica, mantendo-a nessa temperatura por um período adequado e, em seguida resfriando-a ao ar até atingir temperaturas abaixo da região crítica. O tratamento térmico de normalização visa refinar a granulação grosseira de peças de aço fundido, assim como a normalização pode ser aplicada em peças depois de laminadas ou forjadas. (livro e Chiaverini,1986)

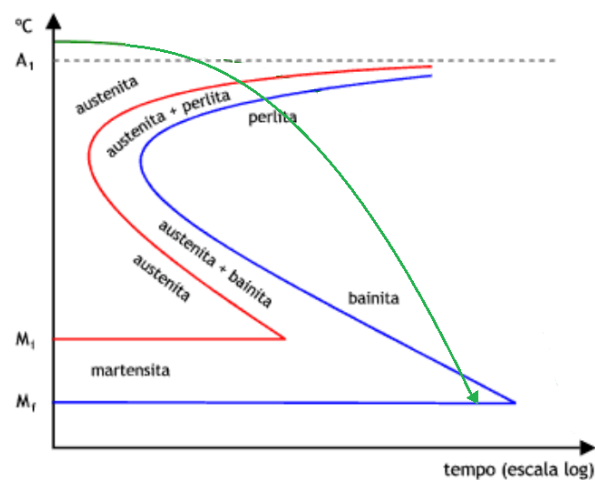
A austenitização é um processo de tratamento térmico em que o material é aquecido a uma temperatura de 30 °C a 80 °C acima da zona crítica conforme Figura 1. No caso de aços hipoeutetóides, essas temperaturas estão acima da temperatura  $A_1$  após a austenitização o resfriamento é realizado de forma lenta e ao ar. O objetivo

desse tratamento térmico é reduzir o tamanho dos grãos e obter uma estrutura de ferrita-perlita (Chiaverini, 2008).

Durante o processo de normalização, existem vários fatores importantes a serem considerados para obter os resultados desejados, dentre eles incluem o aquecimento uniforme das peças, a temperatura de normalização correta, o tempo de encharque adequado e o resfriamento a ar uniforme de calor ou outras técnicas de aquecimento controlado (Colpaert, 2008).

A Figura 5 consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de um resfriamento ao ar, tendo como produto final perlita fina ou perlita e ferrita ou perlita e cementita.

Figura 5 - Diagrama tratamento de normalização



Fonte: Adaptado (Fukumasu, 2016)

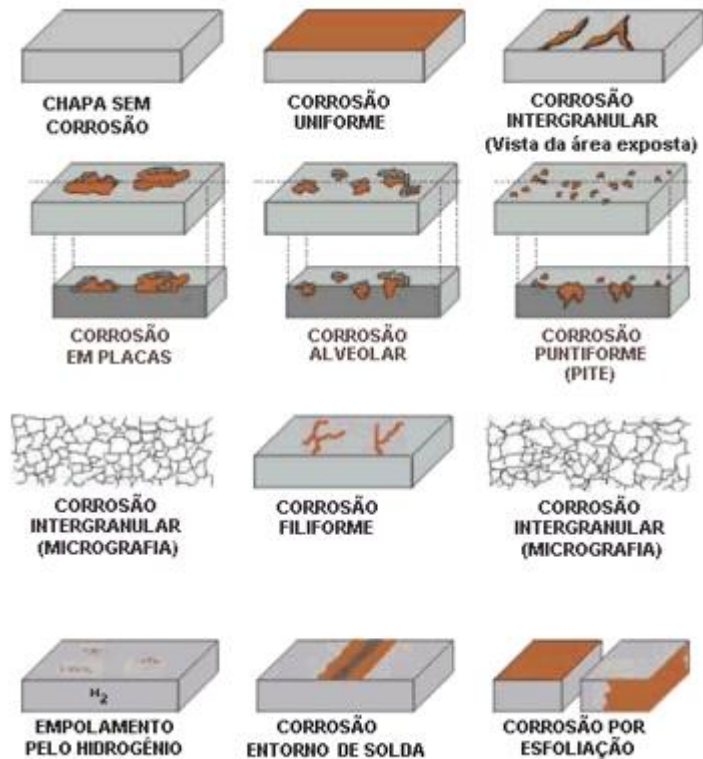
Para o aço com 0,45% de carbono a temperatura de normalização pode variar em uma faixa de 750 °C a 950 °C (Handbook, 2004 - adaptado)

### 3.4 CORROSÃO

Para Gentil (2011) o estudo da corrosão é de extrema importância, pois esse processo pode ocorrer de diversas formas, dependendo de vários fatores, como a morfologia do material, as causas e mecanismos envolvidos, os fatores mecânicos e os meios corrosivos presentes. As diferentes formas de corrosão podem ser

classificadas em vários tipos, incluindo a corrosão uniforme, por placas, alveolar, por pite, intergranular, filiforme, por esfoliação, gráfitica, dezincificação e empolamento pelo hidrogênio como mostrado na Figura 6

Figura 6 - Classificação dos tipos de corrosão



Fonte: (GENTIL, 2011)

A suscetibilidade à corrosão do aço carbono 1045 está relacionada à sua composição química e microestrutura. O teor médio de carbono de 0,45% aumenta sua resistência mecânica, em contrapartida reduz sua resistência à corrosão. Na indústria, o aço é frequentemente utilizado na condição temperada e revenida, ou seja, possui uma microestrutura martenista revenida. Tal microestrutura pode ser mais suscetível à corrosão se comparada a microestruturas mais finas, como a perlita. (Chiaverini,1986).

O aço 0,45% de carbono tem uma grande aplicabilidade industrial em eixos, chavetas, porcas, parafusos, hastes de sondagem, componentes estruturais e etc. (Burguer et al., 2009). Considerando as aplicabilidades descritas os tipos de corrosão

mais comuns são corrosão uniforme resultando em perda geral da espessura ao longo do tempo e corrosão por pite geralmente devido a descontinuidade da superfície como inclusão, falta imperfeições microscópicas, falta de oxigênio, concentração de íons corrosivo ou umidade (Chiaverini,1986).

Na Figura 7 é visto a reação do aço 1045 à corrosão, apresentando formas irregulares conectadas umas com as outras, uma característica de corrosão uniforme, com perda de espessura alterando toda a superfície do material.

Figura 7 - Corrosão do aço SAE 1045



Fonte: (CÁRDENAS-ARIAS, 2020)

Dentre os fatores determinantes para a resistência à corrosão estão a presença de martensita ou austenita retida. Após o processo de têmpera, a estrutura resultante do aço pode variar significativamente devido sua composição química e ao histórico de processamento, o que pode alterar sua microestrutura e torna-lo mais ou menos resistente à corrosão (Lima, 2019)

O carbono desempenha papel crucial na resistência dos aços convencionais, pois, durante o processo de tratamento térmico, é o principal responsável pelo endurecimento do aço através da transformação martensítica. O fósforo e o enxofre, quando presentes em grandes quantidades, conferem fragilidade ao aço. No entanto, quando o enxofre está ligado ao manganês em particular, isso melhora a

usinabilidade, mas compromete a resistência à corrosão, tornando a peça mais suscetível à corrosão (Silva, 2015)

### 3.5 POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

A polarização refere-se ao deslocamento do potencial de cada eletrodo que está em equilíbrio. Magnitude desse deslocamento denominada sobrevoltagem ( $\eta$ ) e é expressa em volts, positiva e negativa, em relação ao potencial de equilíbrio (Callister, 2013).

As causas da polarização são variadas, além de contatos galvânicos, em prática, a polarização pode ser desencadeada pela presença de meio oxidante de concentração única, diferença de temperatura, variações na aeração e influência de fonte externa (Gentil, 2012).

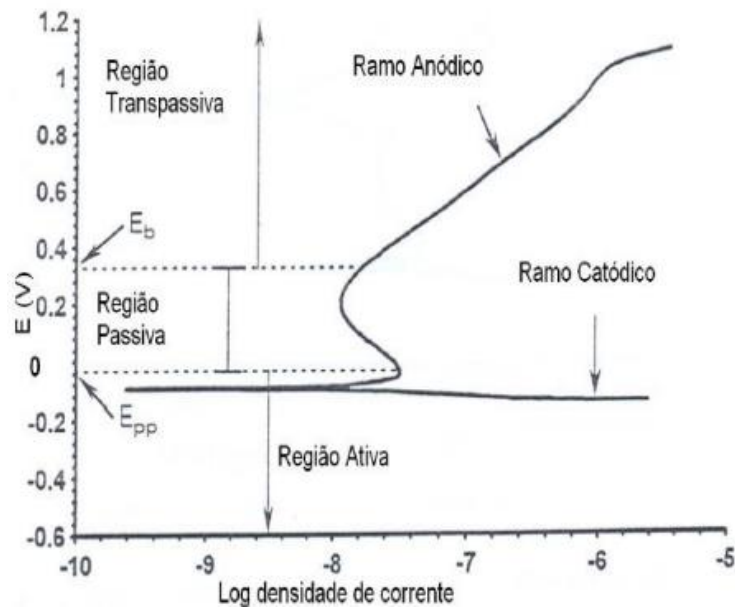
A técnica de curva de polarização, obtida por meio de um potenciostato, é representada no diagrama do potencial de eletrodo (E) em relação à distância da densidade de corrente (i). Essa representação ocorre ao aplicar um potencial inicial ao eletrodo de referência, enquanto também mede a corrente de polarização. A densidade de corrente pode ser determinada dividindo a corrente gerada pela fase da amostra exposta à solução e pelas reações (Gentil, 2012).

As técnicas de polarização linear envolvem uma variação linear de potencial, resultando na resposta da corrente que flui entre o eletrodo de trabalho (ET) e o contra eletrodo (CE), em relação ao potencial. A aplicação de um potencial positivo induz o processo de corrosão no material analisado, permitindo a avaliação de suas resistências por meio do acompanhamento das reações na interface metal/solução, como oxidação, passivação, transpassivação e potencial de pite. (Wolyneq, 2003)

A curva resultante do ensaio de polarização representa uma relação entre a tensão aplicada e a corrente. Nela, podemos obter informações cruciais, como o potencial de passivação primário (Epp), que indica o ponto após o qual a corrente diminui ou se mantém constante até um certo potencial. Outro dado relevante é o potencial de ruptura (Eb), que corresponde ao ponto em que a corrente aumenta devido ao incremento de potencial. A região passiva fica entre o potencial de passivação primário e o potencial de ruptura, enquanto a região ativa é onde os

potenciais são inferiores ao potencial de passivação primário. A porção da curva com potenciais superiores ao potencial de ruptura é chamada de região transpassiva (Morona, 2007). Na figura 8 é possível ver um exemplo dessa curva resultante de polarização potenciodinâmica.

Figura 8 - Curva de polarização



Fonte: . (Morona, 2007)

### 3.6 CURVAS DE TAFEL

O método de Tafel é empregado para determinar o comportamento anódico e catódico dos materiais por meio de curvas de polarização, representadas graficamente pelo potencial (V) em função do logaritmo da corrente ( $\log i$ ). A partir desse método é possível obter a densidade de corrente e corrosão ( $i_{corr}$ ) e o valor da resistência à polarização ( $R_p$ ). Esse método visa avaliar a agressividade das soluções e seu impacto nos materiais por meio da análise das correntes resultantes e da faixa de passivação. Além disso, possibilita a determinação da taxa de corrosão (Wolyneq, 2003).

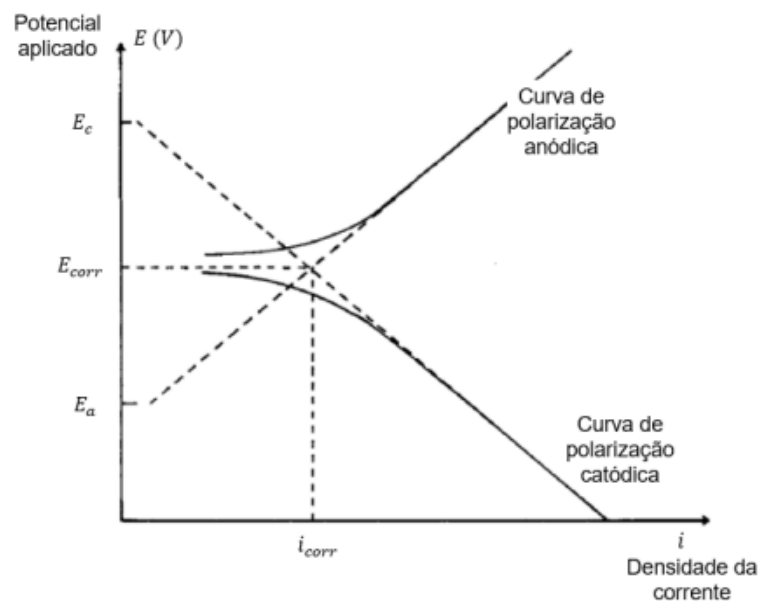
O ponto indicado por  $E_{corr}$  é denominado potencial de corrosão, Figura 9. Quanto mais esse ponto se encontra na região anódica, menor é a suscetibilidade do material à corrosão, indicando uma maior resistência. A densidade da corrente ( $i_{corr}$ ) e a taxa de corrosão estão diretamente relacionadas, ou seja, à medida que o valor

da  $i_{corr}$  diminui, a taxa de corrosão, que representa a capacidade do material de se deteriorar, também é reduzida (Magnabosco, 2001).

Segundo Brett (1996) a partir do potencial de corrosão são conduzidas duas varreduras, uma no sentido anódico e outra no sentido catódico. No entanto é importante observar que as relações de Tafel são aplicáveis exclusivamente em estudos de corrosão uniforme, constituindo uma ferramenta crucial para a avaliação de parâmetros cinéticos desse processo corrosivo.

Na Figura 9 é possível ver as curvas de polarização anódica e catódica traçando retas que irão se encontrar para definir o método de extrapolação de Tafel.

Figura 9 - Representação esquemática das curvas de Tafel



Fonte: (Ferreira, 2022)

### 3.7 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) é uma técnica utilizada para definir sistemas eletroquímicos, viabilizando a possibilidade de uma investigação minuciosa de vários processos que compõem o mecanismo e a cinética de corrosão de um dado sistema (Sanches, 2009)

A EIE segue a lei de Ohm, na qual a impedância ou resistência do sistema é definida como a razão entre o potencial aplicado e a intensidade de corrente. Quando um potencial senoidal é aplicado, a resposta é uma corrente também senoidal,



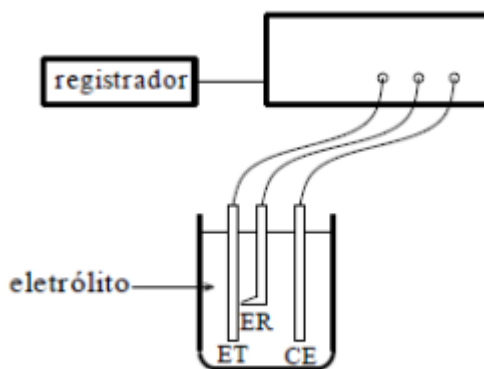
distinguindo-se em fase e amplitude em relação ao sinal de entrada (Cisquini,2014; Melo, 2009). A impedância pode ser expressa em coordenadas cartesianas ou polares possuindo duas componentes, uma real ( $Z'$ ) e uma imaginária ( $Z''$ ) (Melo, 2009).

A corrente alternada pode ser aplicada tanto no modo de potenciostático quanto no galvanostático, para o primeiro caso o microcomputador manda um potencial alternado para a célula, assim a resposta recebida será para a célula, em contrapartida no segundo caso ocorre o inverso (Melo, 2009).

Soares (2013) relata que o potenciostato é um instrumento para o estudo de reações eletroquímicas de um corpo submerso numa solução eletrolítica. O instrumento pode ser mencionado como um circuito elétrico capaz de manter uma diferença entre o corpo de prova (eletrodo de trabalho) e um eletrodo inerte (contra-eletrodo) constante. No geral o contra-eletrodo é construído de grafite ou platina e o eletrodo de referência pode ser o de calomelano saturado.

A figura 10 mostra o processo esquemático de uma célula eletroquímica de EIE no qual é possível identificar o eletrodo de trabalho (ET), contra eletrodo e eletrodo de referência (ER), geralmente feito de platina, mergulhados em um eletrólito.

Figura 10 - Esquema de célula eletroquímica



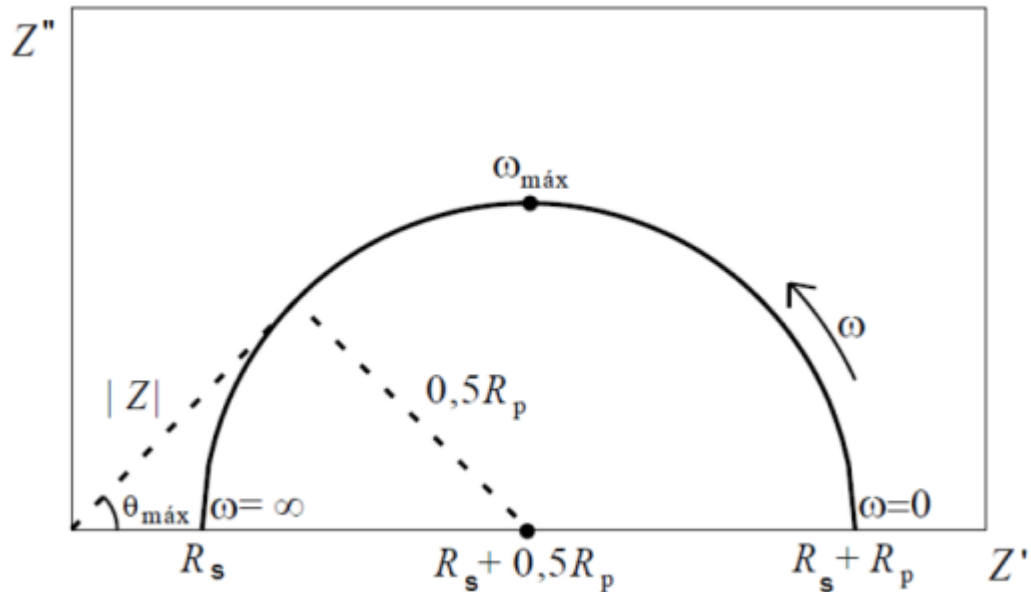
Fonte: (Wolyneq, 2003)

Os resultados podem ser interpretados através do diagrama de Nyquist relacionando componente imaginária em função da componente real. A partir deste diagrama é possível extrair informações como frequência angular( $\omega$ ), resistência da solução ( $R_s$ ), resistência à polarização do eletrodo de trabalho ( $R_p$ ) (Wolyneq,2003).

A figura 11 mostra um diagrama de Nyquist correspondente a um circuito equivalente de Randles, um modelo ideal que é aplicado em alguns modelos de

células eletroquímicas, nos demais circuitos podem aparecer outras variáveis (Wolynec, 2003).

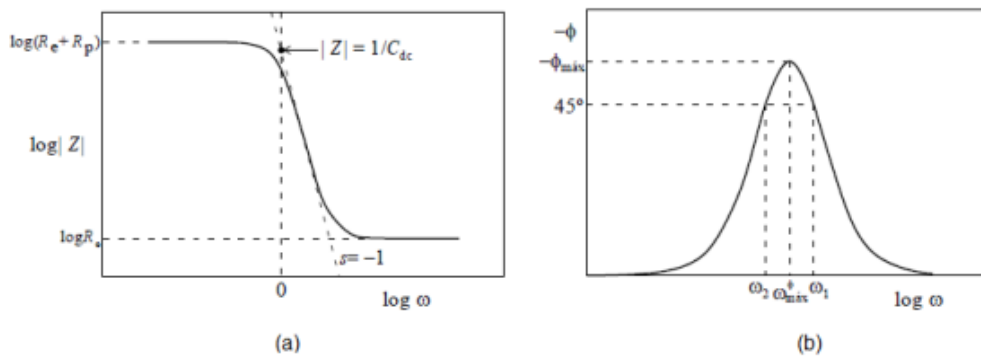
Figura 11 - Diagrama de Nyquist



Fonte: (Wolney, 2003)

Outra forma de representar os resultados é através do Diagrama de Bode, na Figura 12-a nota-se a frequência angular( $\omega$ ) em relação ao módulo da impedância total ( $|Z|$ ), ambos em escala logarítmica; a Figura 12-b mostra a frequência angular, também em escala logarítmica, em relação ao ângulo de fase ( $\phi$ ) (Cisquinin, 2014).

Figura 12 - Diagrama de Bode



Fonte: (Wolneyc, 2003)

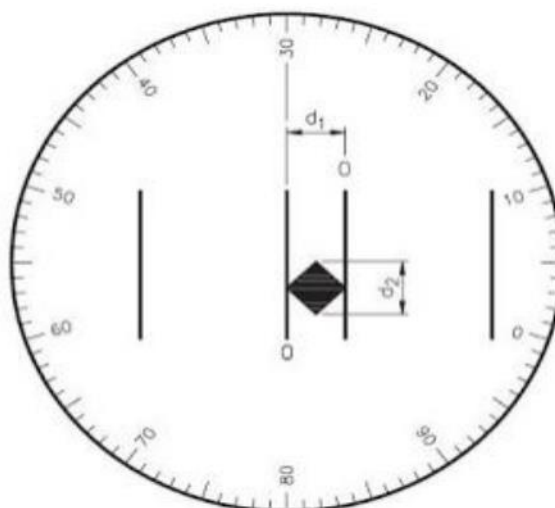
### 3.8 DUREZA

Segundo Garcia (2013) a dureza é uma propriedade que se refere à resistência que um material apresenta ao ser pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, causando riscos ou formação de marcas permanentes. Essencialmente, é uma medida da resistência do material a uma deformação plástica localizada. Nos métodos de ensaio, são utilizados diversos tipos de penetradores com geometrias padronizadas e previamente conhecidas. Ao pressionar esses penetradores na superfície do material, sob condição de pré carga e/ou carga, ocorre inicialmente uma deformação elástica, seguida de deformação plástica. Os resultados permitem o controle de qualidade em relação à resistência à deformação superficial.

O método Vickers, proposto por Smith e Sandland, em 1925, recebeu o nome devido à empresa Vickers-Armstrong Ltds., que fabricou as máquinas para esse modelo. A máquina utiliza um penetrador padronizado em forma de pirâmide de diamante com base quadrada, caracterizado por ângulos de  $136^\circ$  entre os vértices opostos. Essa escala é considerada a mais abrangente em termos de avaliação, permitindo ensaios em materiais muito duros, corpo de prova finos, pequenos e irregulares. Além disso, fornece resultados em uma escala contínua e com maior precisão (Zarur, s.d.).

Na Figura 13 é possível ver a impressão formada pelo indentador no formato de um losango, no qual as diagonais devem ser medidas por um microscópio acoplado ao durômetro.

Figura 13 - Impressão formada pelo indentador



Fonte; (Zarur, s.d.)

A partir das medições de diagonais, utiliza-se a equação 1 para calcular a dureza:

$$HV_{60} = \frac{1,8544 \times F}{d^2} \quad (1)$$

sendo  $F = 60$  e  $d$  é a multiplicação dos números de subdivisões entre as diagonais por  $4 \times 10^{-3} \text{ mm}$  (Zarur, s.d.).

Segundo Zarur (s.d.) inicialmente a peça é cuidadosamente posicionada para que o penetrador faça contato com a superfície, e em seguida, a máquina é zerada. Posteriormente, uma carga crescente é aplicada até atingir o valor definido. Após a descarga a peça é então abaixada para permitir a observação com o auxílio do microscópio, contabilizando os passos entre as diagonais, Tal processo leva à obtenção de um valor final de subdivisões, que é utilizado para o cálculo de dureza Vickers.

### 3.9 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise metalográfica das estruturas é rotineiramente realizada por meio da microscopia óptica, abrangendo ampliações que variam de 50 a 1000 vezes. Em situações que demandam ampliações ainda maiores, a microscopia eletrônica pode ser empregada como uma ferramenta auxiliar nesse processo (Bramfit, 2002).

No microscópio óptico, mediante o uso de iluminação em campo claro, é possível observar certas características e detalhes microestruturais em uma amostra simplesmente polida. Isso pode ser alcançado sem a necessidade de submeter a superfície da amostra a tratamentos ou processos químicos, contanto que as estruturas constituintes do material exibam amplas disparidades na reflexão da luz após o polimento. Em aços ao carbono e ligas de aço, inclusões e precipitados podem ser examinados de maneira precisa e sem grandes dificuldades na condição polida da amostra (Bramfit, 2002).

Para que a análise da microestrutura seja adequada, a superfície do material deve ser submetida a uma técnica de contraste que possibilitará sua visualização. Uma dessas técnicas são os ataques químicos, onde são empregados reagentes que corroem de forma localizada alguns constituintes da superfície do material. O nital é

uma substância química comumente empregada na revelação de microestruturas em aços, destacando os contornos de grãos de ferrita e proporcionando maior contraste para bainita e martensita, resultando em uma tonalidade mais escura para essas duas estruturas (Silva, 2015).

Outro reagente é o picral, que é comumente empregado em aços ao carbono e ligas de aço para atacar a perlita, sendo capaz também de revelar a presença de bainita, martensita temperada, cementita e outros carbonetos (Bramfit, 2002).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foi um tarugo de aço SAE 1045 com comprimento de 1000 mm com Ø 12 mm. Foram coletadas 14 amostras e os cortes foram realizados em uma policorte. Para fins de estudo de corrosão em função da microestrutura, as amostras foram separadas em 3 grupos com 4 exemplares cada e um grupo sem tratamento térmico com apenas 2 amostras.

O primeiro grupo corresponde às amostras que foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera e revenido. Para o tratamento de têmpera as amostras foram submetidas a uma temperatura de 850 °C por 20 min, no fim do tratamento as amostras foram retiradas do forno e imediatamente resfriadas em um reservatório com água, em seguida as amostras foram submetidas ao revenimento a uma temperatura de 450 °C por 20 min com resfriamento ao ar ambiente.

O segundo grupo refere-se a amostras que foram submetidas ao tratamento de recozimento, com amostras que foram aquecidas a temperatura de 850 °C por 20 min e essas amostras foram resfriadas no interior do forno, porém com o mesmo desligado.

Por fim, o terceiro grupo foi submetido ao tratamento térmico de normalização, sendo aquecida a uma temperatura de 850 °C e no fim do aquecimento as amostras foram retiradas do forno e colocadas para serem resfriadas ao ar ambiente.

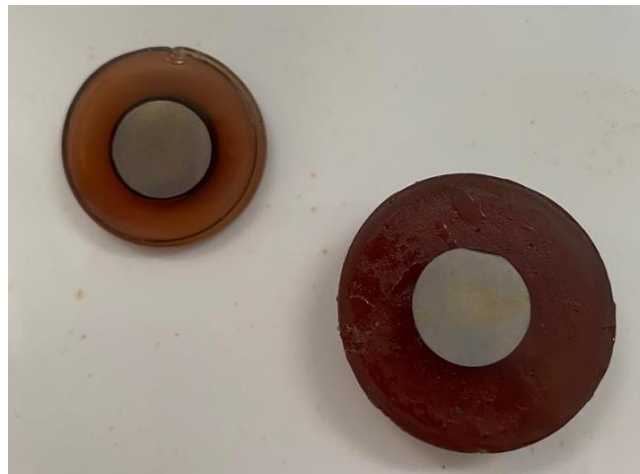
Para obter informações sobre a microestrutura do aço estudado, com as amostras já selecionadas, elas foram submetidas às etapas convencionais de embutimento, lixamento, polimento e limpeza:

- embutimento: algumas amostras foram submetidas ao embutimento a quente no equipamento Embutidora Fortel Digital, utilizando baquelite. Outras amostras foram embutidas a frio utilizando a resina de poliéster para embutimento e deixando descansar por 24h.
- lixamento: No processo de lixamento foram utilizadas lixas d'água com granulometria de 280, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500 mesh
- A cada a troca das lixas fez-se a rotação nas amostras no ângulo de 90° quando as mesmas não apresentavam mais ranhuras da lixa anterior.

- polimento: o polimento foi realizado com pano de polimento e alumina. A avaliação qualitativa da superfície foi feita utilizando um microscópio óptico da marca Optika Microscopes Italy.
- limpeza: A limpeza foi feita com água corrente e sabão líquido, somente água e em seguida foi limpa com álcool isopropílico e secas com jato quente.

Para revelar a microestrutura presente no aço 1045 foi empregado o ataque com nital (1 amostra de cada tratamento e 1 sem tratamento), cuja composição deste reagente consistiu em 3% de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e 97% de álcool etílico. O tempo de exposição da amostra ao reagente foi de 20 segundos, sendo aplicado na forma de gotas sobre a superfície. Em uma fase subsequente, foi conduzido um ataque utilizando Nital 2% por um período de 20 segundos, seguido por ácido pícrico 1,2% por 40 segundos, utilizando o mesmo método de aplicação mencionado anteriormente. Para interromper a ação química, foi utilizada água corrente com sabão, seguida de borrifos de álcool etílico e, por fim, a secagem da amostra foi realizada com jato de ar quente. Na figura 14 é possível observar amostras embutida e preparada para análise microscópica

Figura 14 - Amostras



Fonte: Autor (2023)

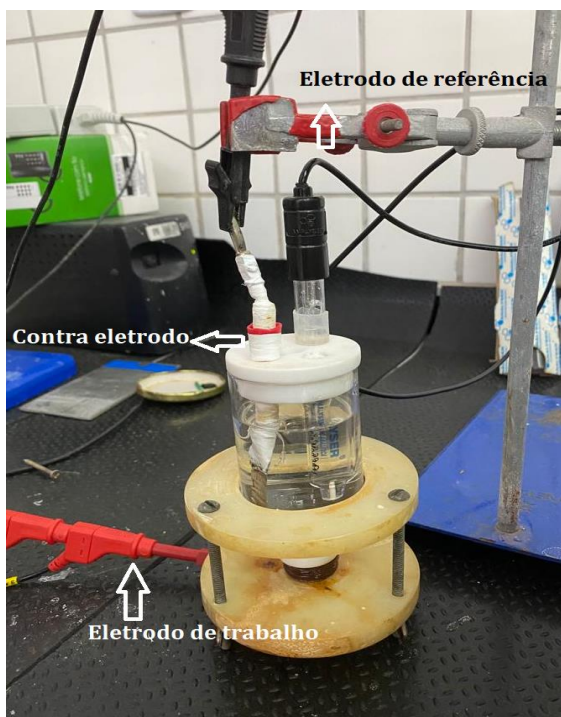
O exame metalográfico foi realizado no Microscópio óptico Trinocular B-1000 Optika. Este equipamento possui um sistema de aquisição de imagens acoplado a um

computador provido do programa Optika preview como ferramenta de auxílio para análise das imagens capturadas.

Nas amostras destinadas para os ensaios eletroquímicos foi conectado um fio de cobre para servir como ponto de contato elétrico durante os ensaios.

Utilizando uma célula eletroquímica composta de três eletrodos: Ag/AgCl(KCl saturado) como eletrodo de referência, platina como contra eletrodo e a amostra como eletrodo de trabalho e o eletrólito sendo NaCl 3,5% como pode ser visto na Figura 15

Figura 15 - Célula eletroquímica



Fonte: Autor (2023)

Para os ensaios eletroquímicos foi empregado o potenciostato PGSTA 302N Autolab acoplado a um computador gerenciado pelo programa Nova 2.1.4. Nesse contexto, os dados de corrente originados da alteração controlada do potencial na amostra são registrados. Esse procedimento ocorre a uma taxa constante, permitindo a medição da velocidade de corrosão por meio da elaboração da curva de polarização. As análises por polarização linear potenciodinâmica (PP) foram realizadas usando



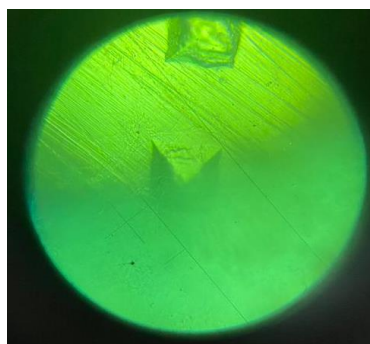
uma taxa de varredura aplicada de  $1 \text{ mV.s}^{-1}$  e com sobretensões anódicas e catódicas de +150 e -150 mV, em relação à potência do circuito aberto e para obtenção da taxa de corrosão foi utilizado o método de TAFEL (Brett, 1996)

Nos ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), a frequência utilizada variou de  $1 \times 10^5$  a 0,01 Hz com amplitude de sinal de 0,01 mV.

A fim de se observar o comportamento mecânico do aço foi realizado o ensaio de Dureza Vickers (HV) através de um microdurômetro modelo Microhardness Tester HV-1000. Empregou-se a carga de 9,8N e tempo de indentação de 15 seg. Para conduzir essa caracterização, as amostras foram submetidas aos procedimentos convencionais de preparação metalográfica, excluindo-se o polimento e o ataque eletrolítico. Realizou-se a coleta de 4 medições em cada amostra, visando obter uma amostragem representativa da dureza em diversos pontos.

Para conduzir essa caracterização, as amostras foram submetidas aos procedimentos convencionais de preparação metalográfica, excluindo-se o polimento e o ataque eletrolítico. Realizou-se a coleta de 4 medições em cada amostra, visando obter uma amostragem representativa da dureza em diversos pontos. As marcas em forma de losango, resultantes das indentações realizadas pelo microdurômetro na amostra como pode ser vista na Figura 16, têm suas medidas diagonais posteriormente quantificadas diretamente no aparelho. A microdureza Vickers é então calculada com base nessas medidas.

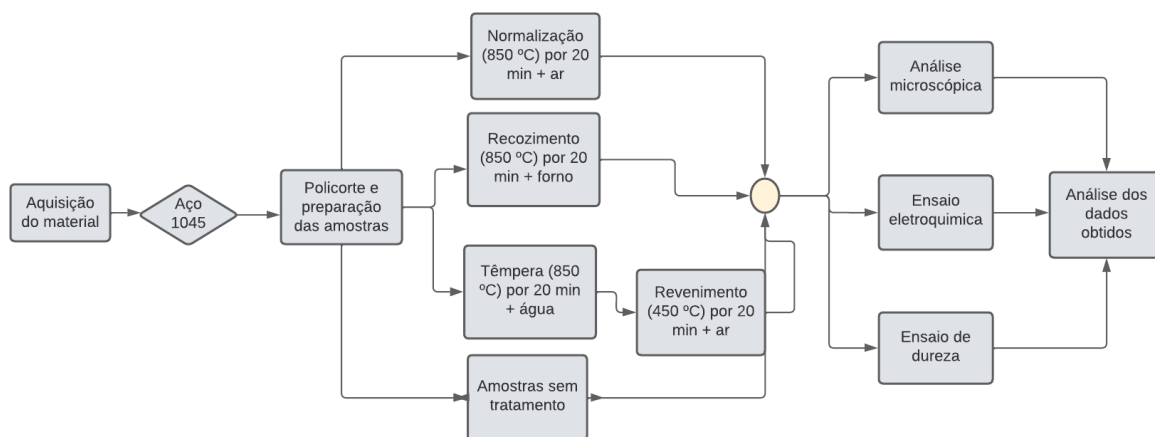
Figura 16 - Indentações em amostra



Fonte: Autor (2023)

O procedimento metodológico será melhor descrito no fluxograma da Figura 17

Figura 17 - Metodologia utilizada no trabalho



Fonte: Autor (2023)

## 5. RESULTADOS

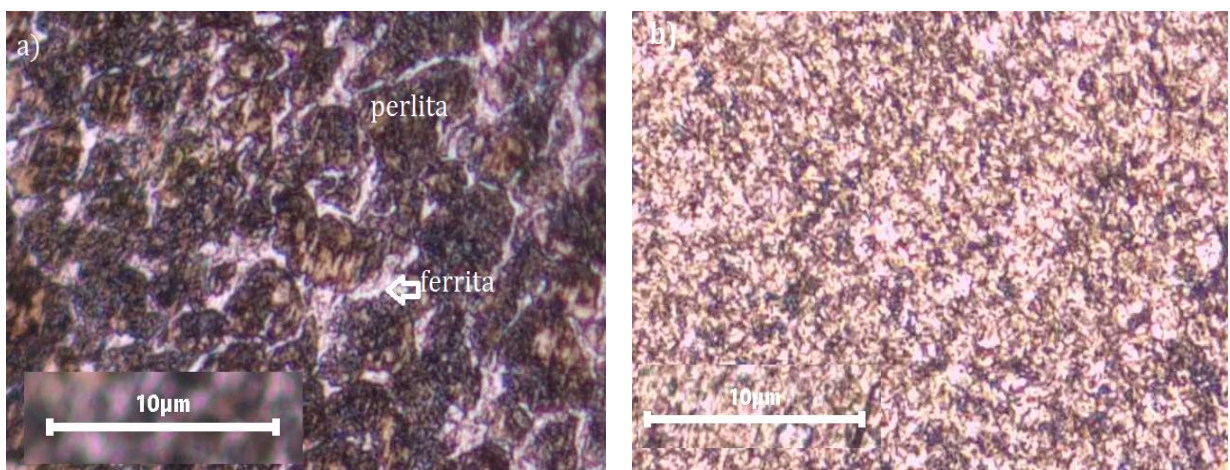
Neste tópico serão abordados os resultados referentes a microestrutura, ensaios eletroquímicos e ensaio de dureza.

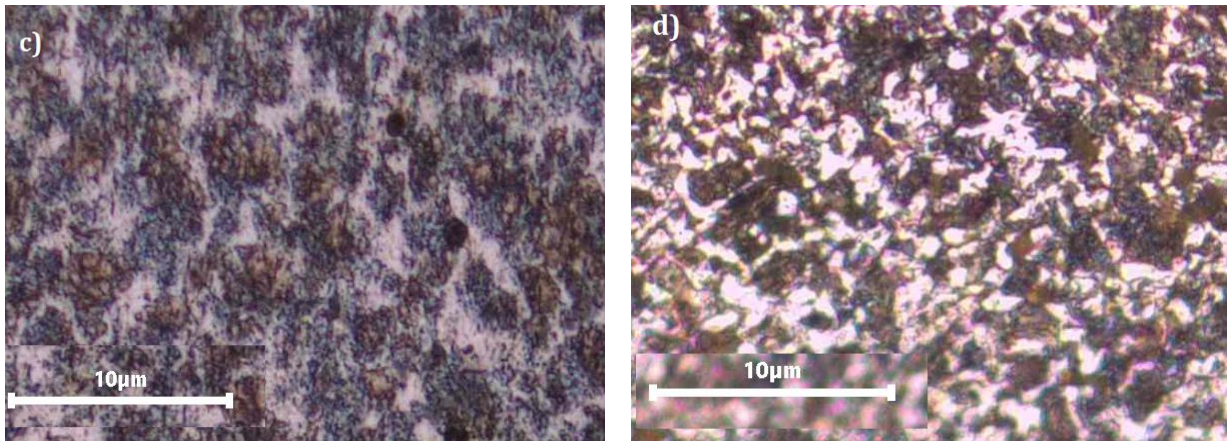
### 5.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL NITAL 3%

A Figura 18-a, representa a microestrutura do aço SAE 1045 em seu estado inicial de aquisição, após passar pelo processo de trefilação. Quanto a eventuais tratamentos térmicos, essas informações não foram disponibilizadas. Analisando a microestrutura é possível notar que sua microestrutura resultante é formada principalmente por ferrita (estrutura mais clara e arredondada) e perlita (estrutura mais escura e alongada). O processo de trefilação pode alterar a microestrutura do material, e essas alterações estão diretamente relacionadas aos parâmetros específicos dos processos de trefilação utilizados.

Vou Segundo Padilha (2004), à medida que o material é submetido à deformação, há um incremento na densidade de discordâncias. No entanto, quando a deformação é realizada a quente, alguns mecanismos termicamente ativados entram em jogo, como a escalagem e o deslizamento cruzado, esses mecanismos promovem o rearranjo das discordâncias resultando na formação de uma estrutura celular.

Figura 18 - Amostras com ataque de nital 3% aumento de 2 a) sem tratamento; b) revenida ; c) recozida; d) normalizada





Por outro lado, nos materiais trabalhados a frio, à medida que são deformados, ocorre um aumento no encruamento e, por conseguinte, na resistência mecânica. Esse aumento é atribuído ao acréscimo na densidade de discordâncias, além disso, os mecanismos térmicos, como a escalagem e o deslizamento, são ativados durante a deformação a quente, não estão presentes nesse processo (Soares, 2013)

Comparando o tratamento de têmpera e revenimento o tratamento de têmpera e revenimento. A martensita revenida é a estrutura predominante, identificada por meio do ataque químico de nital 3%, resultado em uma coloração marrom claro em formato de agulha. Para (Colpaert) o aquecimento abaixo da zona crítica favorece a transformação em fases mais próximas de equilíbrio, até eventualmente atingir microestruturas compostas por ferrita e cementita. Portanto, a estrutura que após a têmpera foi predominante composta por martensita com estrutura TCC monofásica supersaturada com carbono, se transforma nas fases estáveis, ferrita e cementita.

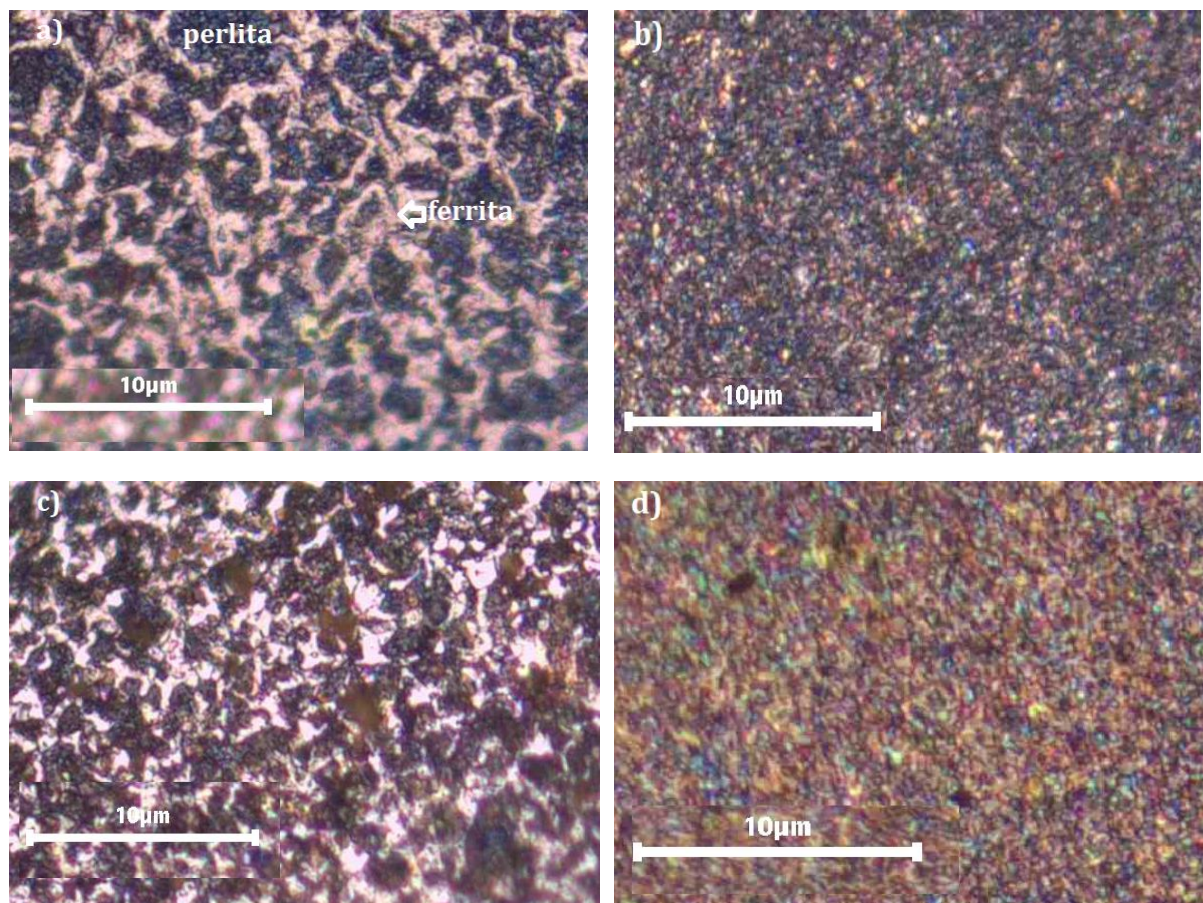
Analisando a Figura 18-c e 18-d para amostras recozida e normalizada é possível observar a presença de grãos mais finos na amostra normalizada, tal obtenção na decorre do processo de formação de perlita durante o resfriamento. Esse resfriamento mais rápido em comparação a amostra recozida, resulta assim, em uma maior quantidade de ferrita contribuindo para a formação de uma perlita mais laminar e de granulação mais fina (Soares, 2013 - adaptado).

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL NITAL 2% E PICRAL 1,2%

O picral, uma combinação de ácido pícrico e álcool, demonstra uma significativa afinidade e habilidade para corroer áreas enriquecidas em carbono na superfície do material. Além disso, sua eficácia tende a aumentar com o tempo de revelação, conforme observado por (Bramfit, 2002).

Na Figura 19-a é possível observar ilhas de perlitas maiores que podem ser influenciadas pelo resfriamento do aço, resfriamento lento permite o crescimento mais extenso das lamelas de perlita. Na Figura 19-b é possível observar partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente distribuídas dentro de uma matriz de ferrítica. O aumento das partículas de cementita pode diminuir na área de contorno e assim aumentar a ductilidade do material.

*Figura 19 - Amostras com ataque de nital 2% e picral 3% aumento 20x a) sem tratamento; b) revenida; c) recozida; d) normalizada*



Analisando as amostras recozida e normalizada (Figura 19-c e 19-d respectivamente) na estrutura recozida, observa-se a presença de ferrita organizada em blocos acompanhadas de lamelas de perlita mais grossa, apresentando certo teor de heterogeneidade em sua configuração. Por outro lado, na amostra normalizada nota-se um refinamento significativo com o microconstituente perlita exibindo granulação mais fina.

O aço em sua forma original, sem ter passado por tratamentos térmicos específicos, exibe semelhanças microestruturais com o aço recozido. Essa semelhança sugere a possibilidade de ter sido submetido previamente a processos de recozimento e trefilação antes de chegar às nossas mãos para a elaboração de amostras.

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Pinedo (2004) enfatiza que o aumento no tamanho dos grãos resulta no aumento da temperabilidade e na diminuição da temperatura de início da transformação martensítica. Conseqüentemente, o teor de austenita retida na matriz aumenta, levando, por fim, a uma redução na dureza do material.

A característica mecânica do aço 1045, segundo valores fornecidos pelo (Matweb ,2019) em diferentes condições metalúrgicas são: 163 HB para o laminado a quente (com bitola de 19-32 mm); 187 HB para o trefilado a frio (com bitola de 16-22 mm); 450 HB para o temperado e revenido; 167 à 229 HB para o normalizado e recozido 178 HV. Segundo tabelas de conversão disponibilizadas em (Metalurgia, 2023) 173 HV para laminado a quente; 196 HV para trefilado a frio, 484 HV para temperado e revenido, 173 HV à 318 HV para normalizado.

Ao examinar a Tabela 1 os diferentes tipos de tratamento térmico, observou-se que o revenimento demonstrou as propriedades de dureza mais favoráveis, ao passo que o recozimento exibiu os valores menos satisfatórios. Os grãos de ferrita apresentam um tamanho maior na estrutura recozida, o que impacta nas propriedades mecânicas. Essa configuração proporciona maior tenacidade, porém resulta em menor dureza, uma vez que a presença de grãos agulhares é reduzida. Ao examinar a dureza na amostra normalizada, observa-se que ela é mais elevada em comparação com a amostra recozida. Isso ocorre devido ao resfriamento mais lento na amostra recozida que foi resfriada no forno, enquanto a normalizada foi resfriada ao ar.

Tabela 1 - Resultado para ensaio de dureza

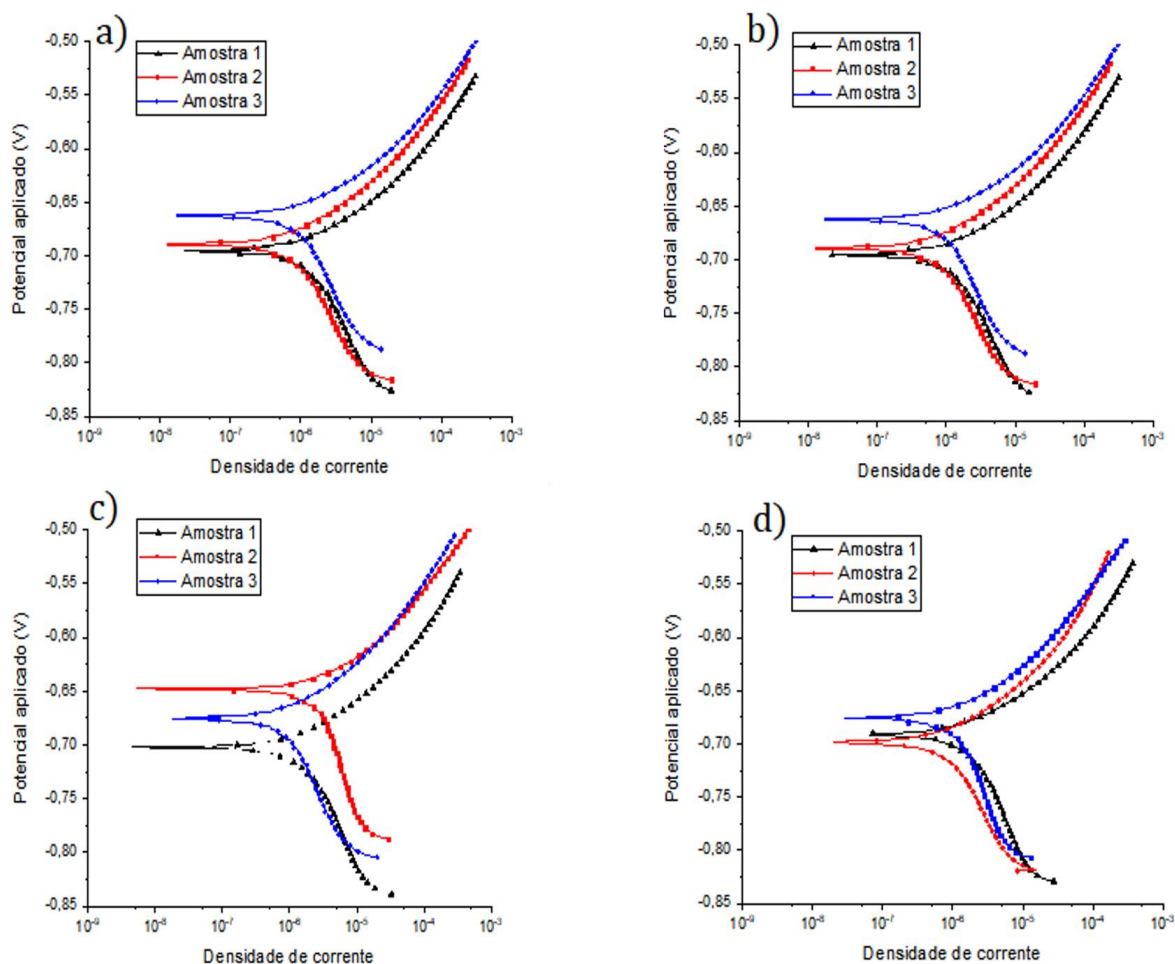
<b>Tratamento térmico</b>	<b>Dureza (HV)</b>
Sem tratamento	301,5 ± 18,25
Revenido	507,0 ± 19,40
Recozido	196,8 ± 9,29
Normalizado	230,6 ± 8,95

Fonte: Autor (2023)

#### 5.4 CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

A Figura 20 representa um gráfico de potencial versus corrente, onde cada tratamento foi realizado em três amostras, identificadas pelas cores preta, azul e vermelha. Os gráficos apresentam comportamentos muito semelhantes, porém é possível perceber que as amostras submetidas ao processo de recozimento foram aquelas que manifestaram maior disparidade entre si, em contrapartida, as amostras normalizadas apresentam valores muito próximos entre si.

Figura 20 - Curvas de polarização a) sem tratamento b) revenido c) recozido d) normalizada



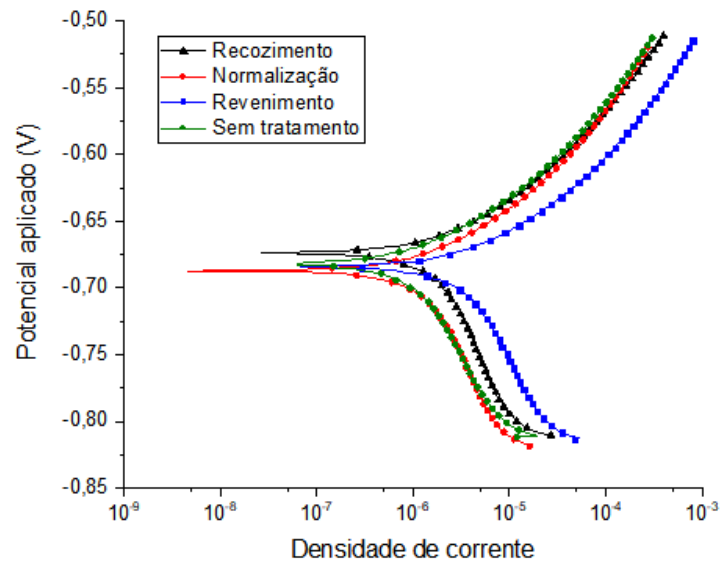
Fonte: Autor (2023)

A partir das médias das amostras foi possível criar um gráfico único com esses valores de polarização como pode ser visto na Figura 21. Na curva de revenimento é possível perceber um notável deslocamento para a região de potencial catódico, juntamente com aumento nas densidades de corrente.

O valor de corrente no ramo anódico para o tratamento de normalização é um pouco menor, porém muito próximo ao de recozimento e revenimento, já para o ramo catódico ele apresenta menores valores de potencial e uma queda na densidade de corrente se comparado ao revenido.



Figura 21 - Média do ensaio de polarização



Fonte: Autor (2023)

As informações da Tabela 2 foram obtidas a partir das curvas de Polarização Potenciodinâmica e incluem dados como potencial de corrosão, densidade de corrente de corrosão e taxa de corrosão. Esses dados foram coletados no gráfico por meio do método de extrapolação de Tafel, empregado o programa Nova 2.1.

Quanto menor a densidade de corrente de corrosão, menor será a velocidade de corrosão (taxa) o que significa uma maior resistência à corrosão. Desta forma, analisando os tratamentos térmicos a partir dos dados obtidos das curvas de polarização que são descritos na Tabela 2, o tratamento que teve melhor resposta quanto a taxa de corrosão, ou seja, possuindo o menor valor para a mesma foi o revenido, seguido do aço sem tratamento, recozido e normalizado respectivamente. Ao se considerar as modificações microestruturais que os tratamentos proporcionam, pode se inferir que a organização e o refinamento dos grãos obtido na amostra revenida leva um melhor desempenho em termos de corrosão.

Tabela 2- Parâmetros do ensaio de polarização

Tratamento térmico	$E_{corr}$ (V) <sup>1</sup>	$J_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	$\beta_{anodico}$ (V/dec)	$\beta_{catódico}$ (V/dec)	Taxa de corrosão (mm/ano)
Sem tratamento	-0,682 ± 0,017	2,24x 10 <sup>-7</sup> ± 0,004	0,017 ± 0,004	0,027 ± 0,010	0,002 ± 0,001
Revenido	- 0,684 ± 0,024	2,039x 10 <sup>-7</sup> ± 0,456	0,014 ± 0,002	0,023 ± 0,007	0,002 ± 0,001
Recozido	-0,692 ± 0,015	3,687x 10 <sup>-7</sup> ± 0,557	0,021 ± 0,005	0,039 ± 0,018	0,004 ± 0,001
Normalizado	-0,688 ± 0,012	2,632x 10 <sup>-7</sup> ± 1,244	0,015 ± 0,001	0,028 ± 0,006	0,027 ± 0,006

<sup>1</sup> $E_{corr}$ : potencial de corrosão; <sup>2</sup>  $J_{corr}$ : densidade de corrosão

Fonte: Autor (2023)

## 5.5 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA (EIE)

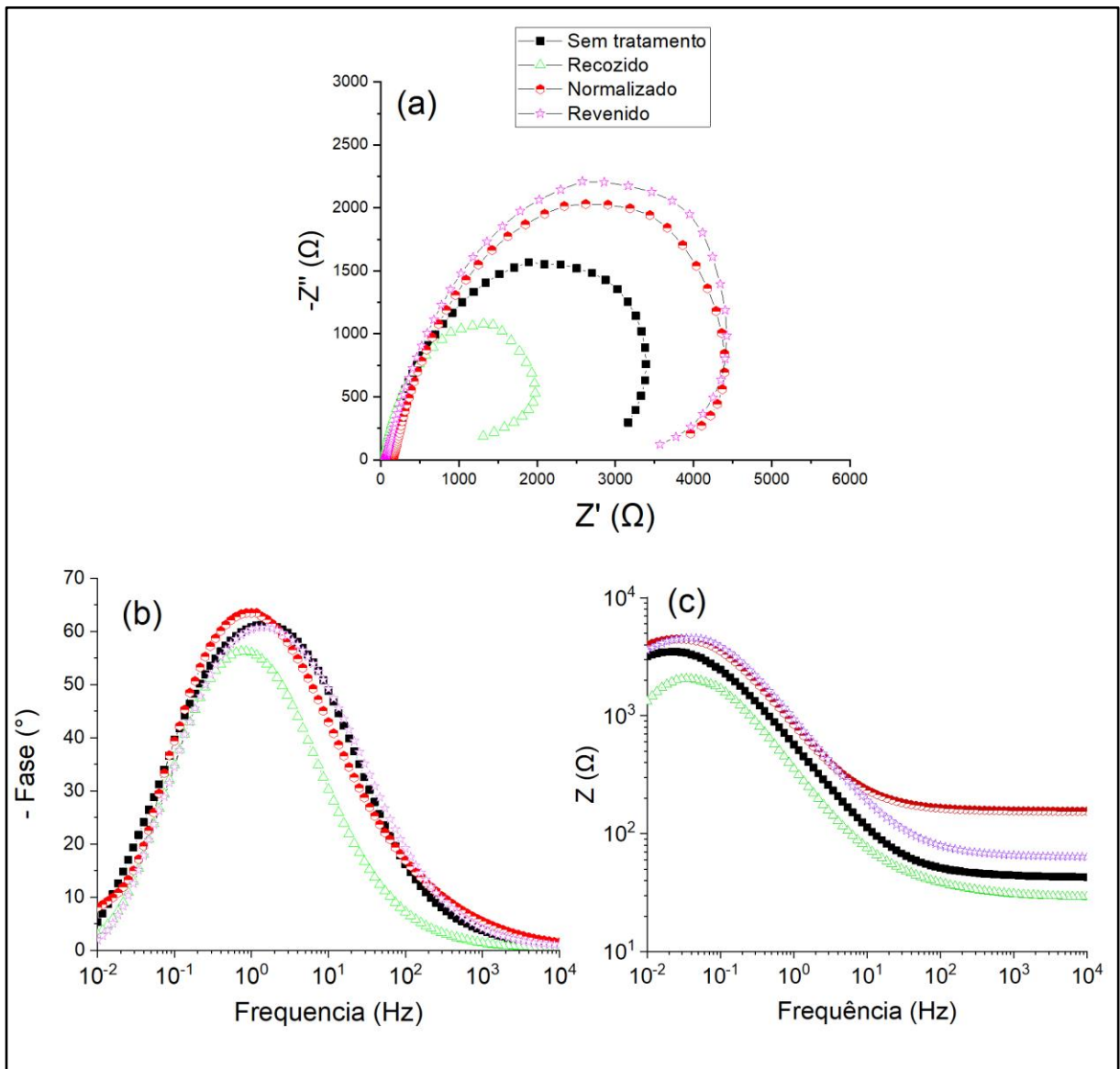
Os diagramas de Nyquist e de Bode são mostrados na Figura 22 respectivamente. O diagrama de Nyquist representa as partes reais (eixo X) e imaginárias (eixo Y) da impedância e o diagrama de bode tem no eixo X o logaritmo da frequência e no eixo y exibe o ângulo de fase e o módulo da impedância.

Para o diagrama de Nyquist Figura 22- a há um aumento no arco capacitivo para o tratamento de revenimento, ou seja, ele confere maior resistência à corrosão.

Segundo Cisquini (2014) no diagrama de Bode de ângulo de fase, a homogeneidade superficial e a resistência à corrosão são ampliadas com o aumento do ângulo de fase e a maior estabilidade do elemento de fase Q. Sendo assim, através da Figura 22-b é possível determinar que o tratamento de normalização atingiu o maior ângulo de fase sendo ele aproximadamente -65° o que indica um caráter capacitivo, porém a curva de revenimento também se mostrou bem próxima.

Na Figura 22-c observa-se um aumento nos valores de impedâncias em baixas frequências angulares principalmente para o revenimento, indicando uma alteração na condutividade elétrica no meio. Esse comportamento sugere que a resposta elétrica em baixas frequências podem ser associada a mudança de condutividade elétrica do meio durante o ensaio.

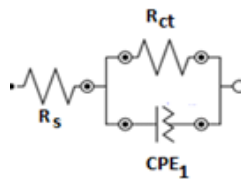
Figura 22 - Resultados do ensaio de EIE para as diferentes condições de tratamento (a) diagrama de Nyquist; (b) bode Fase e (Bode Z).



Fonte: Autor (2023)

Com o intuito de determinar o comportamento corrosivo das amostras quando submetido a tratamentos térmicos foi utilizado o circuito equivalente no qual ele apresenta uma constante  $R_s$ : Resistência da solução,  $R_{ct}$ : Resistência a transferência de carga (polarização) e  $CPE_1$  - Capacitância da dupla camada elétrica. O circuito da Figura 23 descreve o processo de transferência de cargas de uma superfície metálica para o eletrodo-eletrólito, que é provocado por uma corrente ou potencial e que possui valores de resistência a solução e resistência a transferência de carga, sendo assim possível identificar qual o melhor tratamento térmico.

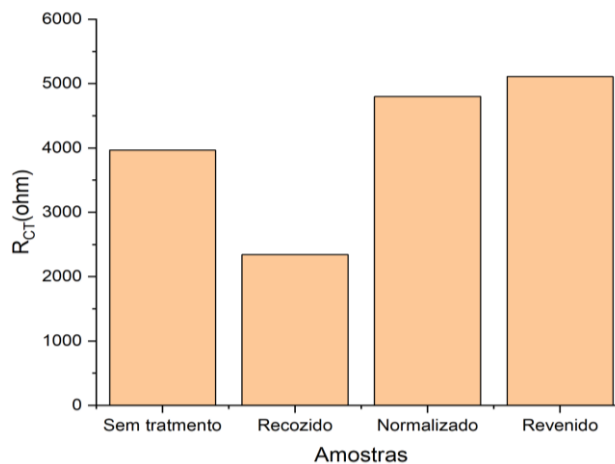
Figura 23 - Circuito do processo de transferência de cargas



Fonte: Autor (2023)

Para a melhor visualização de qual tratamento térmico foi mais eficaz em relação a polarização, tem-se a Figura 24 para relacionar os tratamentos e a resistência a transferência de carga, portanto é notório que o revenido e normalizado foram os tratamentos com melhor desempenho em termos de proteção da superfície contra corrosão.

Figura 24 - Gráfico da relação tratamento térmico x  $R_{ct}$



Fonte: Autor (2023)

## 6. CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou análise sobre as mudanças microestruturais, mecânicas e eletroquímicas do aço 1045. Após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, recozimento e normalização, as principais conclusões foram:

- I. As temperaturas de tempera e revenimento foram suficientes para promover modificações na microestrutura, apresentando graos de ferrita e cementita em menor escala, melhorando propriedades de dureza.
- II. O aço na sua forma de aquisição apresentou microestrutura semelhante ao tratamento de recozimento com perlitas mais grossas e a normalizada apresentou granulação mais fina, assim como era esperado pela literatura (Antonio, 2019)
- III. O ataque com ácido picríco permitiu melhor vizualização de estruturas perlíticas e contrornos de grão que ja haviam sido vizualizados.
- IV. Para o tratamento de revenimento houve uma maior dureza em comparação a outros tratamentos térmicos  $507,0 \pm 19,40$  HV, o que pode ser justificado por sua miroestrurura martensitica.
- V. A amostra sem tratamento possuiu a segunda maior dureza, que sugere que o material foi submetido a algum tipo de tratamento além da trefilação, que por si só, ja modifica a microestrutura.
- VI. Para os ensaios de polarização em solução de NaCl 3,5% a amostra que apresentou melhor resistencia a corrosão foi a submetida a tempera e revenimento se mostrando coerente com os dados de Impendancia. A taxa de corrosão atingiu menores valores de taxa de corrosão.
- VII. Pelo diagrama de Nyquist a amostra revenida apresentou melhores características de resistencia a corrosão pelo aumento do arco capacitivo e através do diagrama de Bode foi possível perceber que os tratamentos de revenimento e normalização se destacaram em relção ao angulo de fazer atingindo aproximadamente  $-65^\circ$  e se mostraram com melhor comportamento a corrosão

Sendo assim o melhor tratamento térmico foi o de revenimento, apresentando melhores características para proteção do aço quanto a corrosão.

## REFERÊNCIAS

AÇOS GERDAU. **Mundo dos aços especiais. Tratamentos Térmicos.** Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod\\_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf). Acesso em: 20 jun. 2023

ANTONIO, Jhony Weliton. **ESTUDO DA DUREZA SUPERFICIAL DO AÇO SAE 1045 EM DIFERENTES CONDIÇÕES METALÚRGICAS.** São Paulo: Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica, 2019.

BRAMFITT, Bruce.L.; BENSCOTER, Arlan. O.. **Common etchants for irons and steels. Advanced Materials & Processes,** 2002 (junho), 2 p

BRETT, A. M. O.; BRETT, C. M. A., *Electrochemistry, Principles, Methods, and Applications*, 1ª ed., New York, Oxford University Press, 1996.

BURGUER, G.R. et al., L.N2; Udesc/cct. Fac. Tec. Senai Felix Gissard, 2009

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução.** Trad. Sérgio Murilo Stamile, 9th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CÁRDENAS-ARIAS, C. G., et al. **Elasticity modulus variation of the AISI SAE 1045 steel subjected to corrosion process by chloride using tension test destructive.** En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. p. 012059

CISQUINI,Paula. **Influência dos Parâmetros de Nitrocementação a Plasma na Resistência à Corrosão e ao Desgaste do Aço AISI 304.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, 2014.

COLPAERT, Hubertus **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns/Hubertus Colpaert; revisão técnica André Luiz V. da costa e Silva.- 4ªedição – São Paulo: Blucher, 2008**

DUTRA, Prof.: Kaio. **Processos Metalúrgicos – LIGAS FERROAS E DIAGRAMA DE FASES.**s.d. 36 slides, color.

CHIAVERIN, V., 2008, **Aços e ferros fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos e materiais – São Paulo: Associação Brasileira de metalurgia, sétima edição**

CHIAVERIN, V., 2003, **Tratamento térmico das ligas metálicas**, São Paulo, Associação Brasileira de metalurgia.

CHIAVERINI, Vicent. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986  
William D. Callister"Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução"

FERREIRA, Kateryne Hamberger **Influência da austenitização, têmpera e revenimento na dureza e resistência à corrosão no aço inoxidável martensítico EN. 1.4116 / Kateryne Hamberger Ferreira ; Gláucio Soares da Fonseca, orientador. Volta Redonda, 2022. 105 f. : il.**

FUKUMASU, Newton K.. **Materiais para Construção Mecânica**. Sao Paulo: Lfs, 2016. 43 slides, color.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013. 365 p.

GENTIL, V.**Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

GUEDES; MONNERAT, **Revista Engenharia de Interesse Social**, VOL. 1, NUM. 2, 2017

HANDBOOK, A. S. M.. **Metallography and Microstructures**, Vol 9.ASM international, 2004

FATEC SERTÃOZINHO. **O que é temperar um liga metálica?** 2022. Disponível em: <https://www.fatecsertaozinho.edu.br/o-que-e-temperar-uma-liga-metalica>. Acesso em: 10 jun. 2023

REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. **The hardening of steel**. In: **R. Physical Metallurgy Principles**. 3. ed. Boston: PWS Publishing Company, 1994. cap. 19, p.632–687.

LIMA, Giselly Bandeira Gomes Dias de. **Avaliação da influencia do processo de têmpera e revenimento sobre a resistência a corrosão do aço martensítico AISI 420/ Giselly Bandeira Gomes Dias de Lima; orientador, Marcio Roberto da Rocha, 2019. 75 p**

METALURGIA, Rijeza. **Conversão de Durezas**. Disponível em: [file:///C:/Users/Samsung/Desktop/tcc-%20polariza%C3%A7%C3%A3o/picral%20100x/1533757415dureza\\_brinell\\_rockwell\\_vickers.pdf](file:///C:/Users/Samsung/Desktop/tcc-%20polariza%C3%A7%C3%A3o/picral%20100x/1533757415dureza_brinell_rockwell_vickers.pdf). Acesso em: 5 dez. 2023.

MELO, Régis Lopes. **Eletrodeposição, Caracterização e Estudos de Corrosão de Camadas de Ni-Mo-P**. 2009. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MAGNABOSCO, R. **Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205)**, 2001.

MATWEB, MATERIAL PROPERTY DATA. AISI 1045 Steel, Disponível em: <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=1045>. Acesso em: 8 dez. 2023

MORONA, Marcelo Tadeu. Ensaio Eletroquímicos e Influência da Nitretação à Plasma na Resistência à Corrosão do Aço Inoxidável ISO 5832-1. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007

PADILHA, Angelo F.; AMBROZIO FILHO, Francisco. **Técnicas de análise microestrutural**. Brasil: Hemus, 2004. 190 p.

PINEDO, C. E. **Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros – tratamento térmico**. São Paulo: 2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes - ABM, 2004.

PORTO, M.B.; ALVIM, L.B.; DE ALMEIDA NETO, A.F. **Nickel removal from wastewater by induced co-deposition using tungsten to formation of metallic alloys**. J Clean Prod., v.142, p.3293-3299, 2017.

SANCHES, Leonardo Paiva. **Estudo Comparativo Quanto a Resistência à Corrosão entre Aços Inoxidáveis Utilizados em Trocadores de Calor**. 2009

SANTOS, Hedipo Pereira dos. **CHARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AÇOS 1020, 1045, 5160, 8620 APÓS OS DETERMINADOS TIPOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS DE TÊMPERA, REVENIMENTO, NORMALIZAÇÃO E RECOZIMENTO**. 2021. 76 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - Ce, 2021.

Soares, Renata Braga. **Avaliação da resistência à corrosão de aços carbono baixa liga usando a espectroscopia de impedância eletroquímica e ensaios de campo**/ Renata Braga Soares. 2013.

SCHEIDEMANTEL, R. H. **Utilização de métodos teóricos para avaliação da temperabilidade Jominy de aços com diferentes composições**



**químicas**.2014.UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Trabalho de conclusão de curso.9

SILVA, Amanda Cristina Medeiros da. **ESTUDO DA TEMPERABILIDADE DO AÇO SAE 1040**. Abm Week, Rio de Janeiro, RJ, v. , n. , p. 2682-2688, 21 ago. 2015.

SMITH, William Fortune. **Structure and properties of engineering alloys**. McGraw-Hill Book Co., xiv+ 512, 23 x 16 cm, illustrated (16. 95), 1993.

USIMINAS. **Tratamento térmico dos aços**. Minas Gerais: Centro de Desenvolvimento de Pessoal - Phd, s.d. 146 p.

VIANA, Dávila de Oliveira. **TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇO CARBONO ASTM A36 E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO**. 2019. 68 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - Ce, 2019.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo, EDUSP, 2013

ZARUR, Guilherme Dias. **ANÁLISE DE ENSAIOS DE DUREZA EM AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA EM DIVERSOS ESTADOS**.