

Centro Universitário Evangélico de Goianésia - Uniego
Curso de Engenharia Mecânica

DANILO LUÍS DE OLIVEIRA
MATEUS HENRIQUE VENÂNCIO COSTA

ESTUDO DA EFICÁCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS
NA OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS FERROSOS

Publicação Nº 01

Goianésia - GO
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, MATEUS HENRIQUE VENÂNCIO. OLIVEIRA, DANILO LUÍS DE.

Estudo da eficácia dos tratamentos térmicos e termoquímicos na otimização das propriedades mecânicas dos metais ferrosos 2025 01, 23P, 297 mm (ENC/Uniego, Bacharel, Engenharia Mecânica, 2025).

ARTIGO – Uniego – CENTRO UNIVERSITÁRIO EVANGÉLICO DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Mecânica.

- | | |
|---------------|--------------------|
| 1. Têmpera | 2. Reozimento |
| 3. Cementação | 4. Tratamento |
| I. ENC/FACEG | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Henrique, M. V. C, Luís, D. O. Estudo da eficácia dos tratamentos térmicos e termoquímicos na otimização das propriedades mecânicas dos metais ferrosos, Publicação 01 2025/2 Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 23p. 2025.


CESSÃO DE DIREITOS

NOMES DOS AUTORES: Mateus Henrique Venâncio Costa e Danilo Luís de Oliveira

TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Estudo da eficácia dos tratamentos térmicos e termoquímicos na otimização das propriedades mecânicas dos metais.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica ANO: 2025

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



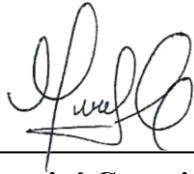
Mateus Henrique Venâncio Costa
76380-266. Goianésia/GO - Brasil



Danilo Luís de Oliveira
76381-161. Goianésia/GO - Brasil


**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, EM FORMA DE ARTIGO,
SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIEGO**

Aprovados por:



**Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes, Dra. (Uniego)
(ORIENTADORA)**

**Alessandro Morais Martins, Me. (Uniego)
(EXAMINADOR INTERNO)**

 Documento assinado digitalmente
CESAR RAMOS RODRIGUES FILHO
Data: 12/12/2025 19:17:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**César Ramos Rodrigues Filho, Me. (Uniego)
(EXAMINADOR INTERNO)**

ESTUDO DA EFICÁCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS NA OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS FERROSOS

Danilo Luís de Oliveira¹, Mateus Henrique Venâncio Costa²
e Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes³

¹Acadêmica de Engenharia Mecânica/FACEG Email: daniloluis584@gmail.com

²Acadêmico de Engenharia Mecânica /FACEG Email: mateushvc659@gmail.com

³Orientador(a) e Professor(a) do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG Email: mariaeroing@gmail.com

Resumo: Os tratamentos térmicos e termoquímicos possuem uma longa trajetória histórica, estando presentes desde as primeiras civilizações que trabalhavam com metais. No entanto, foi apenas durante o século XX, com o avanço da Revolução Industrial, que esses processos se tornaram mais precisos e eficientes, permitindo um controle rigoroso das propriedades dos materiais. O presente trabalho tem como objetivo estudar a eficácia dos tratamentos térmicos e termoquímicos, com foco nos processos de têmpera, cementação e recozimento, visando a otimização das propriedades dos metais ferrosos. Para isso, busca-se compreender as alterações microestruturais e suas influências em características mecânicas como a dureza. Para a realização do estudo, foram selecionados metais como aço 1020 e ferro fundido, os quais foram submetidos a processos de aquecimento e resfriamento de acordo com a metodologia específica de cada tratamento. Em seguida, foram aplicados testes de dureza e avaliação microscópica das amostras, possibilitando a análise das transformações estruturais ocorridas e o efeito na dureza desses materiais. O processo de recozimento gerou 24% de diminuição de dureza em relação a amostra sem tratamento. O processo de têmpera sobre resfriamento em água obteve 4% de aumento, óleo 5% e salmoura 11% sobre o aumento de dureza. A cementação obteve 11% de aumento médio em relação ao aço sem tratamento. De modo geral, o estudo reafirma a importância da engenharia de tratamentos térmicos e termoquímicos como ferramenta funcional de ligas metálicas em ambiente industrial.

Palavras-chave: Têmpera; Recozimento; Cementação; Tratamentos Térmicos.

Abstract: Heat and thermochemical treatments have a long history, being present since the first civilizations that worked with metals. However, it was only during the 20th century, with the advancement of the Industrial Revolution, that these processes became more precise and efficient, allowing for rigorous control of material properties. This work aims to study the effectiveness of heat and thermochemical treatments, focusing on quenching, carburizing, and annealing processes, aiming at optimizing the properties of ferrous metals. To this end, it seeks to understand the microstructural changes and their influence on mechanical characteristics such as hardness. For the study, metals such as 1020 steel and cast iron were selected, which were subjected to heating and cooling processes according to the specific methodology of each treatment. Subsequently, hardness tests and microscopic evaluation of the samples were applied, allowing for the analysis of the structural transformations that occurred and the effect on the hardness of these materials. The annealing process generated a 24% decrease in hardness compared to the untreated sample. The quenching process followed by water cooling resulted in a 4% increase, oil 5%, and brine 11% in hardness increase. Carburizing resulted in an average 11% increase compared to untreated steel. Overall, the study reaffirms the importance of heat treatment and thermochemical engineering as a functional tool for metal alloys in an industrial environment.

Keywords: Tempering; Annealing; Carburizing; Heat Treatments.

INTRODUÇÃO

Os tratamentos térmicos possuem uma longa história relacionada à sua origem, remontando à idade do Bronze, quando os primeiros artesãos descobriram que, ao aquecer e resfriar metais era possível alterar as propriedades do material. Posteriormente, a utilização deste processo possibilitou flexibilidade, na criação de peças durante a Revolução Industrial, promovendo o surgimento do processo de Bessemer, viabilizando a produção em escala de aço. Na sequência, no século XXI, tecnologias digitais impulsionaram novas pesquisas relacionadas aos tratamentos térmicos [1].

Os tratamentos termoquímicos possuem uma longa história, estando presentes nas primeiras civilizações que trabalhavam com metais. Estudiosos apontam que as

primeiras evidências indicam que ferreiros já utilizavam este processo para endurecer as armas e ferramentas, em sua maioria por meio do processo de cementação. No século XIX, com a inovação da metalurgia, os tratamentos termoquímicos começaram a ser fundamentados por pesquisas científicas. Durante o século XX, com a evolução da indústria siderúrgica moderna, os tratamentos termoquímicos tornaram-se mais controlados e precisos [2].

A cementação é um processo termoquímico que promove a difusão de carbono na superfície de metais, promovendo assim uma camada endurecida resistente ao desgaste, enquanto seu núcleo é maleável. Esse conjunto de propriedades torna o processo fundamental para componentes como eixos e engrenagens, devido a impactos e variação de cargas dos quais são submetidos. Avaliar

corretamente o processo garante a qualidade e a durabilidade das peças [3].

Os tratamentos térmicos, por sua vez, são descritos para modificarem estruturas internas, promovendo uma nova configuração estrutural. As necessidades de desenvolvimento de novos materiais se baseiam no crescimento da tecnologia industrial. Deste modo, a obtenção da evolução mecânica e microestruturas dos materiais desencadeiam melhorias para determinadas aplicações industriais. Essas diversas microestruturas modificam as propriedades mecânicas dos materiais, sendo gerenciadas conforme projetadas. Neste cenário, para promover fatores que se tornam diferenciais sobre o âmbito industrial, utilizam-se os tratamentos térmicos [4].

O processo de têmpera é crucial para aumentar a dureza e a resistência de desgaste dos metais, sendo fundamental em materiais que sofrem elevados níveis de atrito e tensão, a exemplo das ferramentas de corte e engrenagem. Em contrapartida, os materiais metálicos que passam pela têmpera podem sofrer problemas quanto à ductibilidade, necessitando de um estudo minucioso sobre as condições a serem aplicadas [5].

O processo de recozimento fornece inúmeros benefícios sobre as ligas metálicas, sendo destaque o alívio de tensões e a proporção de maleabilidade dos materiais. Deste modo, este processo é indispensável para peças que passem por processos de conformação mecânica. Outro fator importante é a homogeneidade da microestrutura, do qual resulta em melhores propriedades mecânicas e maior estabilidade dimensional, facilitando as etapas subsequentes de usinagem [6].

A otimização das propriedades mecânicas depende de vários fundamentos, como temperatura, tempo de exposição e resfriamento, buscando potencializar a resistência ao desgaste e à corrosão, dentre outras características. Realizar a avaliação desses tratamentos requer uma análise detalhada da microestrutura resultante e ensaios mecânicos, assegurando que as propriedades foram utilizadas [7]. As técnicas desenvolvidas permitem melhorar características como resistência ao desgaste,

durabilidade, tenacidade e dureza, garantindo que o material atenda às demandas e aplicações industriais [8].

A têmpera e o recozimento são tratamentos térmicos amplamente utilizados nas aplicações industriais, uma vez que sua ação age na modificação das propriedades mecânicas dos metais, tornando-os mais adequados para a utilização [9]. Por outro lado, a cementação (carbonetação), sendo um dos tratamentos termoquímicos importantes quando se trata do foco em aumentar a dureza e resistência ao desgaste, é bastante discutida em solo industrial. Os processos térmicos agem de forma conjunta sobre os materiais, promovendo maior resistência, visto que aumentam a vida útil dos metais [10].

O estudo referente à eficácia dos tratamentos térmicos e termoquímicos dos metais é de suma importância para as mais diversas aplicações industriais, uma vez que esses materiais podem atender requisitos de resistência, tenacidade, dureza e ductibilidade. Essas características podem ser aperfeiçoadas mediante processos de tratamento controlados que serão implementados [11].

Os metais, principalmente os ferrosos, como aços e ferros fundidos, desempenham papel essencial em aplicações estruturais e componentes mecânicos devido à sua versatilidade, resistência e disponibilidade. Diversos estudos demonstram a eficácia dos tratamentos na melhoria das propriedades mecânicas. Estudos observaram o aumento de aproximadamente 180% na dureza superficial de um aço AISI (American Iron and Steel Institute) 1020 após o processo de cementação seguido de têmpera, atingindo valores próximos a 746 HV (Harolness Vickers) [12].

No trabalho apresentado por Moura et. al. (2020), o processo de cementação do aço 8620 a 930°C, por 8 horas, gerou uma camada cementada próxima a 1,2 mm, obtendo uma dureza superficial de 700 HV e resistência de tração com 25% de elevação. [13]. O processo revenido após a cementação demonstrou que aços temperados podem reduzir a fragilidade sem comprometer a dureza, obtendo equilíbrio entre resistência e tenacidade [14].

Mediante a crescente demanda do meio industrial, a busca por materiais mais resistentes, eficientes e duráveis gerou o avanço de estudos referentes a estes processos. A correta aplicação dos tratamentos térmicos e termoquímicos permite a criação e melhoria de peças com propriedades mecânicas, gerando redução sobre custos referentes à manutenção e aumentando a confiabilidade do produto final [15].

O presente estudo tem como objetivo avaliar a eficiência dos tratamentos térmicos e termoquímicos, em especial a têmpera, cementação e recozimento, focando em aços de alto e baixo teor de carbono e ferro fundido. Além disso, busca-se investigar como esses tratamentos influenciam características físicas e mecânicas dos materiais, uma vez que será realizada análise detalhada de cada tratamento aplicado.

REFERENCIAL TEÓRICO

A promoção de processos eficientes é fundamental para atender às exigências na indústria, uma vez que a melhoria nas propriedades dos metais garante maior durabilidade quanto ao desempenho do material. Sabe-se que os tratamentos térmicos e termoquímicos, como têmpera, cementação e recozimento, são amplamente utilizados para modificar as características dos metais, forjando materiais metálicos mais resistentes e propícios a aplicações específicas [16].

Os tratamentos térmicos e termoquímicos, além de promover a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais metálicos, permitem otimizar os processos produtivos. Compreender a temperatura, tempo de exposição e níveis de resfriamento contribui para uma fabricação mais assertiva, minimizando os defeitos na etapa final. Além disso, a sustentabilidade é fornecida, uma vez que tratamentos bem planejados reduzem o desperdício de materiais e garantem melhor vida útil dos componentes metálicos, evitando, dessa forma, a constante manutenção e a reposição de novas peças [17].

Dentre os tratamentos térmicos utilizados, destacam-se a têmpera e o recozimento, uma vez que cada

tratamento possui características específicas, sendo as principais o alívio de tensão, refinamento de grãos e endurecimento do material [18]. Os tratamentos termoquímicos, como a cementação, promovem a difusão de elementos químicos sobre a superfície do metal, promovendo aumento da dureza e resistência ao desgaste [19].

A eficiência dos tratamentos térmicos e termoquímicos está relacionada à microestrutura do material. O processo de modificação dos grãos, bem como a transformação das fases, impactam diretamente as propriedades mecânicas. A têmpera, por sua vez, resulta na formação de martensita, uma fase extremamente resistente e dura. No processo termoquímico, a introdução de elementos como o carbono, na superfície do metal, promove a formação de compostos com elevada dureza, dos quais melhoram a resistência e aumentam a vida útil dos componentes [20].

A têmpera é um dos tratamentos térmicos mais utilizados quando se trata de aumentar a dureza e resistência dos materiais, principalmente em aços. O processo consiste em aquecer o material a uma temperatura acima da zona crítica do aço (ponto em que ocorre a transição de fase do aço), seguida de resfriamento em água, óleo ou salmora. A têmpera tem como objetivo principal promover a modificação da microestrutura do aço, formando martensita, uma fase dura e resistente [21].

A eficiência da têmpera está relacionada à composição química do material e ao controle dos parâmetros térmicos empregados. Durante o aquecimento, desenvolve-se a estrutura austenita, que irá dissolver os carbonetos e homogeneizar a distribuição de carbono nos aços. Quando o material é resfriado rapidamente, impede a difusão do carbono, influenciando na transformação de austenita em martensita. A martensita pode promover fragilidade excessiva o que, por diversas vezes, torna viável um tratamento posterior, como o revenido, que atuará no alívio de tensões internas e no controle sobre as propriedades mecânicas [22].

A têmpera pode ser realizada com diferentes tipos de resfriamento, sendo água, salmoura (sal diluído em água) e óleo. Cada processo possui características específicas que influenciam na propriedade final do material. A têmpera em água, por sua vez, é mais agressiva, gerando o resfriamento mais rápido. Este processo resulta em elevada dureza e resistência mecânica, podendo gerar tensões internas elevadas, o que possibilita o risco de surgirem trincas e distorções. O processo de resfriamento por meio aquoso, é ideal para aços de baixo teor de carbono [23]. A têmpera em óleo possui um resfriamento moderado, demandando mais tempo do que o processo em meio aquoso. Esta metodologia reduz o risco de trincas e

deformações, mantendo dureza sem comprometer a tenacidade. Este processo é indicado para aços que exijam equilíbrio entre dureza e ductibilidade [24].

A têmpera em diluição à base de sal oferece resfriamento controlado e uniforme, estando entre o processo à base de água e óleo. Este processo é fundamental para a formação de bainita em vez de martensita. Sendo amplamente utilizado em peças que possuem a geometria complexa, minimizando distorções e garantindo maior uniformidade da estrutura [25].

A Tabela 01 demonstra as características e diferenças entre os 3 tipos de resfriamento durante o tratamento de têmpera.

Tabela 01: Característica do processo de têmpera

Critérios	Água	Óleo	Salmoura
Velocidade	Rápida	Moderada	Elevada
Dureza	Alta	Média-alta	Elevada
Aplicações	Elevada dureza	Menores Trincas	Peças precisas
Risco de Trincas	Alto	Médio	Elevado

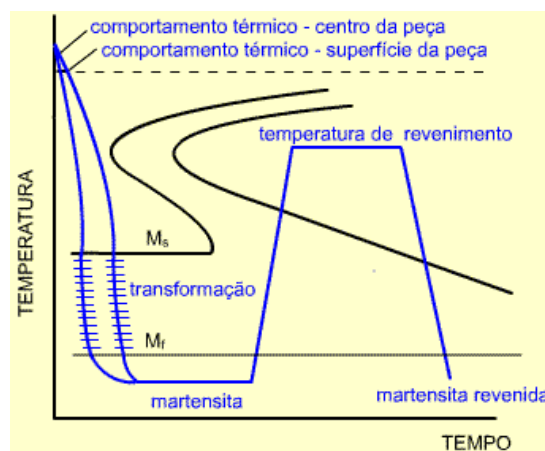
Fonte: Adaptado de Callister, 2022.

A Figura 01 ilustra o processo de resfriamento rápido característico do tratamento térmico de têmpera, aplicado a um aço eutetóide, no diagrama Temperatura-Tempo-Transformação (TTT) desse material. Esse procedimento inicia-se com o aquecimento do aço até uma temperatura acima da zona crítica, onde ocorre a formação da austenita. Em seguida, o material é submetido a um resfriamento abrupto, normalmente em meios como água, óleo ou salmoura, com o objetivo de impedir a formação de estruturas como perlita ou bainita.

Esse resfriamento rápido promove a transformação da austenita em martensita, uma fase metastável extremamente dura e frágil, que se forma devido à rápida queda de temperatura que impede a difusão do carbono. A martensita apresenta alta dureza e resistência ao desgaste, sendo essencial em componentes

que exigem desempenho mecânico elevado, como ferramentas de corte, engrenagens e eixos [4].

Figura 01: Diagrama TTT para formação de têmpera e revenido.



Fonte: Novikof, 1994.

O revenido é um processo térmico realizado após o tratamento de têmpera. Este possui a finalidade de

reduzir a dureza (que tende a ser excessiva após a têmpera), as tensões internas do material (consiste em tensões residuais induzidas pela têmpera, evitando rachaduras ou deformações não planejadas) e aumentar a ductilidade e tenacidade (melhora a resistência ao impacto e a capacidade do material em se deformar) [4].

O processo de revenido começa após o aço ser aquecido a uma temperatura determinada, podendo variar de acordo com o aço a ser estruturado. Em suma, o revenido atua sobre temperaturas de 150° a 650°,

dependendo do tipo de liga e da aplicação. Em sequência, o aço é mantido em temperatura constante por um determinado tempo, sendo que esse tempo varia conforme a aplicação e o material utilizado. Por último, o resfriamento é controlado, sendo efetuado lentamente com auxílio do forno para controle de temperatura [4].

O processo de têmpera e revenido são bastante semelhantes, porém apresentam algumas características que demonstram pontos de diferença entre eles. Tal análise pode ser percebida conforme a Tabela 02.

Tabela 02: Diferença entre o processo de têmpera e revenido.

Características	Têmpera	Revenido
Objetivo	Aumenta dureza e resistência	Reduz tensão e melhora ductilidade
Processo	Temperatura elevada	Reaquecimento com temperatura inferior
Resfriamento	Rápido (Meio líquido ou ar ambiente)	Controlado (Ar ambiente ou forno)
Efeito de Dureza	Aumento da Dureza	Resistente ao impacto
Microestrutura	Martensita dura e frágil	Martensita dúctil
Aplicações	Ferramentas e peças sujeita ao impacto	Peças que precisam de tenacidade

Fonte: Adaptado Callister, 2002.

Inúmeros fatores influenciam no resultado da têmpera, como a composição do material, temperatura da austenitização, resfriamento, meio de têmpera utilizado, dentre outros. A presença de alguns elementos como níquel e cromo pode retardar a formação de martensita e melhorar a temperabilidade do aço, promovendo dureza uniforme em peças com maiores espessuras. Por sua vez, a escolha do método é fundamental, pois age diretamente na velocidade da transformação de fases [21].

Por outro lado, o recozimento é um tratamento térmico usado para restaurar as propriedades mecânicas dos metais, uma vez que consiste no aquecimento até a temperatura de austenitização, seguido de resfriamento lento e controlado, geralmente dentro do forno. O processo reduz a dureza, alivia tensões internas, melhora a microestrutura e aumenta a ductilidade, tornando o material mais maleável

para etapas subsequentes, como usinagem e conformação mecânica [21].

No recozimento, ocorrem três etapas: recuperação, com redução das tensões sem alterar a estrutura; recristalização, que formam novos grãos substituindo os deformados e crescimento de grãos, onde grãos maiores se desenvolvem em altas temperaturas por tempo prolongado, resultando em perlita grossa. [4].

O recozimento é empregado em diversos ambientes industriais, destacando-se na fabricação de chapas metálicas, componentes automotivos, tubulações e ferramentas. Na indústria metalúrgica, esse processo é fundamental para melhorar a conformidade dos metais antes do processo de laminação [26].

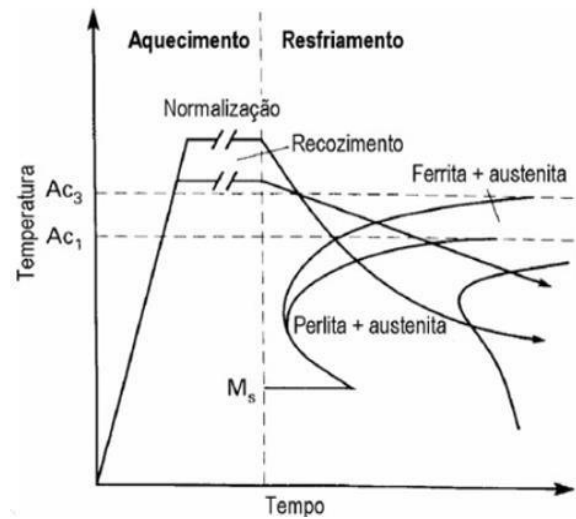
A normalização visa refinar os grãos, aumentar a resistência mecânica e a tenacidade do material. O aquecimento é semelhante ao recozimento, mas o

resfriamento ocorre ao ar ambiente, mais rápido que no recozimento. Isso gera uma microestrutura com perlita fina, grãos menores e melhor distribuídos. [26].

A principal diferença entre os tratamentos térmicos recozimento e normalização está na taxa de resfriamento. O recozimento é indicado em materiais que necessitam obter maior ductilidade e facilidade no processo de usinagem. Já o tratamento por meio da normalização, é efetuado em peças dos quais exigem maior resistência e uniformidade estrutural [27].

O diagrama TTT para normalização demonstra como a microestrutura do aço se transforma, ao longo do tempo, em diferentes temperaturas quando o material é resfriado ao ar ambiente. Ele permite visualizar de forma clara os caminhos de transformação e as velocidades necessárias para que cada fase se forme. Esse diagrama é essencial para compreender o surgimento de microestruturas como perlita, martensita e bainita, permitindo prever o comportamento do aço durante o tratamento térmico. Essas transformações podem ser observadas de maneira ilustrativa na Figura 02.

Figura 02: Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento pleno e normalização superpostos à curva TTT de um aço.



Fonte: Novikof, 1994.

O processo de recozimento e normalização apresentam várias semelhanças em seus objetivos e etapas gerais. No entanto, cada um deles resulta em microestruturas e propriedades finais distintas, principalmente devido às diferenças no resfriamento. Enquanto o recozimento proporciona maior maciez e alívio de tensões, a normalização tenta gerar uma estrutura mais refinada e resistente. As principais diferenças podem ser resumidas na Tabela 03.

Tabela 03: Diferença processo de recozimento e normalização.

Característica	Recozimento	Normalização
Objetivo	Reduz dureza e alivia tensões	Refina grãos e aumenta resistência
Processo	Temperatura AC3 e AC	Temperatura AC3 e AC1
Resfriamento	Lento (Dentro do forno)	Rápido (Ar ambiente)
Microestrutura	Perlita Grossa (grãos grandes e uniformes)	Perlita Fina (grãos menores e refinados)
Dureza	Material mais macio	Material mais resistente
Aplicações	Peças usinadas e conformadas	Resistência Mecânica

Fonte: Adaptado de Chiaverini, 2008.

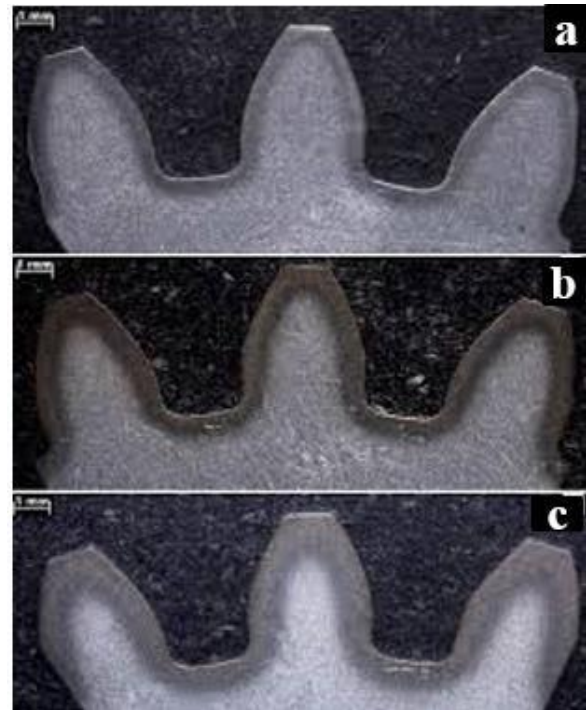
A cementação é utilizada para elevar a dureza superficial dos aços, melhorando sua resistência ao desgaste e à fadiga. Este processo consiste na introdução de carbono na camada superficial do metal, este processo é efetuado sob elevadas temperaturas. A cementação permite a obtenção de uma camada endurecida, mantendo o núcleo dúctil e tenaz, equilibrando fatores que influenciam a resistência ao desgaste e à durabilidade dos materiais [28].

O processo de cementação é um tratamento térmico termoquímico que envolve a difusão atômica de carbono na superfície do aço. Durante esse processo, o aço é exposto a um ambiente rico em carbono, o que permite a absorção de átomos de carbono pela superfície metálica. Esses átomos se difundem gradualmente para o interior do material, formando uma camada endurecida, enquanto o núcleo mantém suas propriedades de tenacidade e resistência ao impacto [29].

A cementação é utilizada em indústrias que necessitam de componentes com elevada resistência ao desgaste e fadiga. Peças como rolamento, engrenagens, eixos e ferramenta de impactos tendem a ser submetidas a esse tratamento tendo como foco aumentar a durabilidade. Os materiais que passam pelo processo de cementação operam sob cargas elevadas e impactos repetitivos. Essa possibilidade é derivada da combinação de uma superfície endurecida com um núcleo mais dúctil [30].

Após análise microestrutural de um aço de baixo teor de carbono, é possível identificar diferentes estágios de formação da camada cementada, conforme ilustrado na Figura 03. A Figura 03(a) mostra a fase inicial do processo, com tempo de exposição reduzido, resultando em uma camada superficial fina. Já a Figura 03(b) evidencia uma camada cementada mais profunda, indicando maior tempo de exposição ao ambiente rico em carbono. Por fim, a Figura 03(c) representa o estágio avançado da cementação, com uma camada superficial espessa e bem definida. Ao comparar as três imagens, observa-se que a principal diferença está no tempo de exposição à cementação, quanto maior esse tempo, mais profunda será a camada cementada formada na superfície do material.

Figura 03: Microestrutura da camada cementada de engrenagens cilíndricas sobre diferentes tempo de exposição de aço SAE 4320.



Fonte: Revista Técnico-Científica do CREA-PR, 2018.

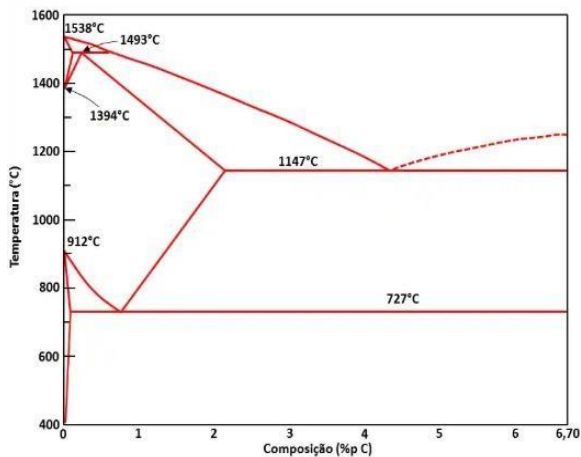
A cementação sólida é um processo em que o aço é imerso em um material sólido rico em carbono, sendo aquecido à temperaturas entre 900°C e 950° C. Neste processo, o carbono se difunde na parte superficial do aço, aumentando sua dureza. Esta ação tende a ser simples, porém é mais lenta que os outros métodos. Este processo é frequentemente usado em peças que não exigem grande escala de produção [31].

A cementação líquida consiste em um banho de sais fundidos, como nitrato ou carbonato de sódio. O aço é aquecido entre temperaturas de 850° C e 950° C e imerso sobre esses sais fundidos, permitindo que os carbonos se dissolvam e difundam no aço. Esse processo é mais rápido do que a cementação sólida, oferecendo melhor controle da profundidade e qualidade da camada cementada [32].

A cementação gasosa envolve o uso de gases ricos em carbono, como o monóxido de carbono ou metano, com temperaturas entre 900°C e 1000°C. Durante o processo, o gás se difundirá na superfície do aço, promovendo a introdução de carbono, gerando aumento sobre a dureza superficial [33].

A Figura 04 representa o diagrama Ferro Carbono, um gráfico que demonstra a forma do qual o ferro e carbono se combinam em diferentes temperaturas e percentuais de carbono, formando microestruturas diferentes no aço e no ferro fundido. Conforme o diagrama, foi possível determinar a temperatura de exposição sobre o aço 1020 e ferro fundido, em processos térmicos e termoquímicos.

Figura 04: Diagrama Ferro-Carbono



Fonte: Novikof, 1994.

O diagrama ferro-carbono é de referência na área da metalurgia, pois permite compreender as transformações que ocorrem nas ligas de ferro carbono, como aços e ferros fundidos, em função da temperatura e da porcentagem de carbono presente. Com esse diagrama é possível identificar as diferentes fases e microestruturas, assim compreender as propriedades mecânicas do material [4].

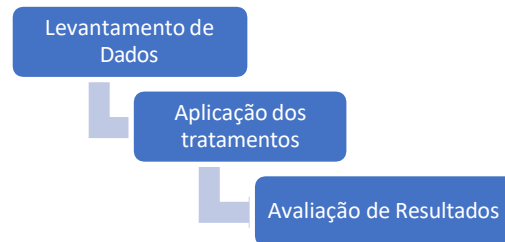
METODOLOGIA

Mediante o estudo qualitativo, inicia-se a pesquisa exploratória, uma vez que esta metodologia irá preencher lacunas de informação pertencentes ao trabalho. A referida pesquisa se deve ao fato de o estudo ultrapassar os conhecimentos empíricos e fomentar em testes laboratoriais [34].

Quanto ao meio de pesquisa, possui característica exploratória, pois busca apresentar informações e construir uma familiaridade do objetivo, podendo intercalar

hipóteses iniciais e testes realizados para obtenção de um planejamento estratégico sobre sequência.

Figura 05: Cronograma relacionado ao desenvolvimento do projeto.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Durante o desenvolvimento do trabalho, o projeto foi dividido em três etapas. A Figura 05 demonstra, de forma clara, como ocorreu a divisão, sendo a primeira etapa o levantamento de dados referentes a tratamento térmico e termoquímico, escolha dos metais a serem trabalhados, bem como referências bibliográficas pertencentes ao tema. A segunda etapa consistiu em preparar os metais e aplicar os tratamentos térmicos e termoquímicos sobre os mesmos e, por fim, a terceira etapa compreendeu em realizar os testes, obtendo cerca de 5 corpos de provas por processo, efetuando estudo sobre a parte microestrutural, bem como realizar o comparativo entre os resultados obtidos e os parâmetros empregados pela literatura.

A escolha dos materiais é fundamental para o processo de tratamento térmico e termoquímico. Alterar as propriedades estruturais, bem como aumentar a dureza e ductibilidade, requer uma série de fatores que iniciam na escolha do metal até a finalização do tratamento. A Tabela 04 indica os materiais escolhidos para os estudos referentes a cada tratamento mencionado.

Tabela 04: Metais utilizados no projeto

Tratamentos	Metais
Têmpera	Aço 1020
Recozimento	Ferro fundido cinzento
Cementação	Aço 1020

Fonte: Próprio autor, 2025.

Após a escolha dos materiais a serem utilizados e a definição dos tratamentos (têmpera, recozimento e cementação), iniciou-se o planejamento para a realização da preparação das amostras. Com o auxílio da Cortadora Metalográfica (Modelo CF1160, pertencente à empresa Fortel) Figura 6 (a), os metais são cortados com espessura de 3 a 5 cm. Na parte interna, foi adicionada uma solução 1:30 de líquido refrigerante, com o intuito de resfriar a amostra enquanto efetua o corte, de modo que a temperatura ocasionada pelo atrito do disco ao metal não eleva-se e, conseqüentemente, altera a propriedade dos metais.

A Figura 06 apresenta os equipamentos laboratoriais da Uniego utilizados na preparação das amostras metálicas, abrangendo desde o corte inicial até o polimento final. No caso da cementação, o processo teve início com a preparação do material, seguida do

aquecimento, em meio rico em carbono, para promover a difusão atômica. Por outro lado, nos tratamentos de têmpera e recozimento, as amostras foram previamente seccionadas e, em seguida, submetidas ao aquecimento em temperaturas específicas, de acordo com o ciclo térmico desejado, antes de passarem pela preparação metalográfica.

Aspectos como a sequência de preparação, a taxa de aquecimento e resfriamento, o tempo de exposição térmica e o tipo de tratamento aplicado influenciam diretamente as transformações microestruturais. Esses fatores são determinantes para a análise dos resultados obtidos, permitindo correlacionar os procedimentos adotados com as propriedades finais observadas no material.

Figura 06: Equipamentos utilizados na preparação das amostras: a) Cortadora metalográfica, b) Embutidora e c) Lixadeira Politriz



Fonte: Próprio autor, 2025.

Para o processo de cementação, após o metal ser cortado, ele foi submetido à embutidora metalográfica (Modelo EFD30, pertencente à empresa Fortel), na Figura 6 (b). Na embutidora, foi adicionado baquelite em pó para preenchimento do espaço. Após colocar o material, foi pressurizado o sistema por meio da alavanca frontal e manter uma pressão entre 1000 e 2000 lbf/pol²,

ajustando a temperatura para 150° C, aquecendo por 12 minutos e, posteriormente, resfriando por 8 minutos, totalizando 20 minutos de embutimento.

Após esse processo, as amostras foram encaminhadas para a lixadeira politriz (Modelo PLFDV, pertencente à empresa Fortel), na Figura 6 (c), onde foram submetidas a um polimento adequado para remoção de irregularidades e preparação da superfície

para análise posterior. Iniciando com a lixa 40 e seguindo com 80,120,240,600,800,1200,200 (Iniciando com lixa própria para desbaste e seguindo até a última gradação, sendo própria para polimento) e lixa de polimento. Após trocar cada lixa, a amostra foi rotacionada 90°. O processo foi concluído quando o metal teve aparência lisa e com aspecto espelhado.

Finalizado o processo de preparo metalográfico, as amostras encontraram-se aptas para a realização dos ensaios de dureza e análise microestrutural por microscopia óptica.

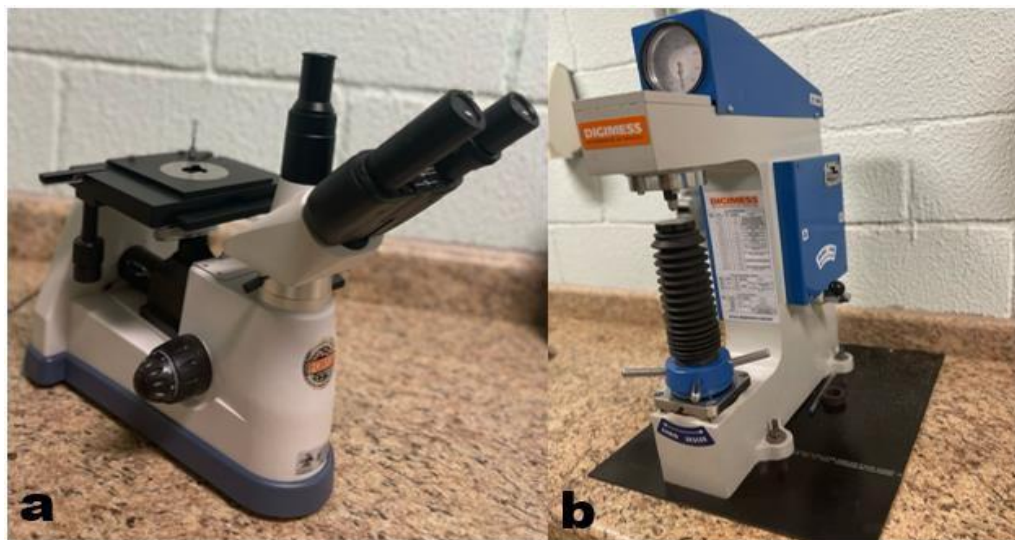
Para garantir a representatividade e a reprodutibilidade dos resultados, foram analisados, em média, cinco corpos de prova por tipo de tratamento térmico, tanto para o ensaio de dureza, quanto para a observação microscópica. Essa abordagem estatística visa minimizar possíveis variações individuais entre as

amostras e fornecer uma avaliação mais precisa dos efeitos promovidos pelos diferentes ciclos térmicos no comportamento do material.

A utilização de múltiplas amostras permite estabelecer uma média confiável dos resultados obtidos, além de identificar desvios padrões que podem indicar inconsistências no processo ou variações naturais no material. Além disso, essa metodologia contribui para validar a eficácia dos tratamentos térmicos aplicados, permitindo comparações mais robustas entre as diferentes condições de processamento térmico e seus impactos sobre as propriedades mecânicas e microestruturais do aço analisado.

A figura 07 demonstra os equipamentos que foram utilizados para a realização dos testes de dureza e microscopia das amostras preparadas.

Figura 07: Equipamentos utilizados nos testes: a) Microscópio Óptico e b) Durômetro



Fonte: Próprio autor, 2025.

Inicialmente, foi feito o ensaio de dureza Rockwell, onde o durômetro pertencente à empresa Digimess Instrumentos de precisão (Figura 7.b), em que constitui um método mais comumente para ser utilizado na medição de dureza, pois são simples de efetuar a execução.

As amostras foram submetidas à análise microscópica da camada superficial. Esse processo foi realizado com o auxílio do microscópio óptico (Modelo

1933479, pertencente à empresa Fortel) (Figura 7.a). A configuração do microscópio foi ajustada com aumento gradual da ampliação, permitindo uma observação detalhada das características microestruturais da amostra. A cada nível de ampliação, foram coletadas informações sobre a distribuição dos constituintes da microestrutura, possíveis variações na camada superficial e a qualidade do tratamento térmico ou termoquímico aplicado.

A Figura 08 demonstra o Pêndulo, também conhecido como teste de impacto Charpy ou ensaio Charpy, sendo utilizado para padronizar medida de resistência, impacto e deformação de um material.

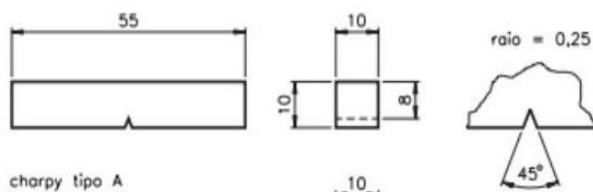
Figura 08: Pêndulo Charpy



Fonte: Próprio autor, 2025.

Conforme a ISO 148-1 e ASTM E23 a peça para efetuar o teste de impacto deve obter geometria e dimensão padronizada, uma vez que na parte central da peça um pequeno corte “Entalhe em V” é colocado para efetuar os testes. A Figura 09 demonstra as medidas propostas pela norma técnica.

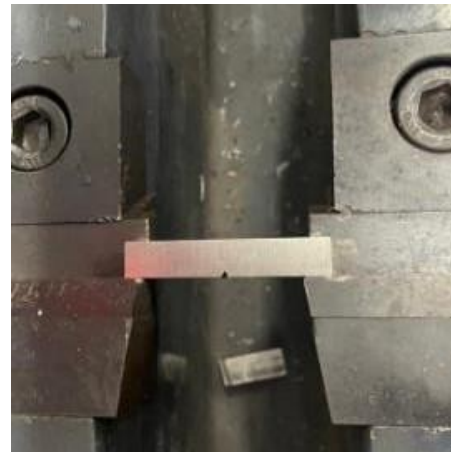
Figura 09: Dimensões peça para teste de impacto



Fonte: Norma Brasileira ISO 148-1, 2021

A Figura 10 demonstra o ferro fundido no estágio de preparo para realização do teste de impacto, mantendo as medidas conforme a norma técnica. A Figura em questão está classificada nas dimensões 55x10x10 mm e o entalhe em V com profundidade de 0,25 mm, uma vez que o corte está situado na parte central da peça.

Figura 10: Corpo de prova para teste de impacto



Fonte: Próprio autor, 2025.

A Tabela 05 relaciona os tratamentos térmicos e termoquímicos realizados com suas respectivas temperaturas e tempos de aquecimento. Esses parâmetros foram definidos com base na análise do diagrama ferro-carbono, permitindo determinar as faixas ideais para o aquecimento e transformação das fases do aço 1020. O controle preciso da temperatura e do tempo é essencial para assegurar a formação adequada das estruturas desejadas, como a austenita durante o aquecimento e sua posterior transformação, em fases mais duras, após o resfriamento, garantindo assim melhores propriedades mecânicas.

Tabela 05: Relação entre tempo e temperatura dos processos térmicos e termoquímicos.

Processos	Temperatura (°C)	Tempo (h)
Têmpera	900	2
Recozimento	950	4
Cementação	900	0,5

Fonte: Adaptado de Chiaverini, 1996.

A Figura 11 apresenta o forno mufla, equipamento utilizado no aquecimento de metais, e demonstra, em seu interior, a disposição dos cadinhos. Esses cadinhos foram empregados para separar as amostras de metal durante o processo de aquecimento, permitindo o controle adequado da temperatura e a fusão eficiente dos materiais.

Figura 11: Forno mufla

Fonte: Próprio autor, 2025.

A utilização do forno mufla foi de forma variada, uma vez que o aquecimento, tempo de exposição e resfriamento foram conforme os parâmetros dos tratamentos térmicos e termoquímicos, apresentados na Tabela 05.

O processo térmico de têmpera e recozimento foram divididos em algumas etapas até a obtenção dos resultados, sendo eles:

1. Preparação da amostra: cortar em pequenas partes;
2. Aquecimento: temperatura e tempo de exposição controlada;
3. Resfriamento: rápido na têmpera (em água, óleo e salmoura) e lento no recozimento;
4. Embutimento;
5. Lixamento: até obter caráter espelhado;
6. Análise microscópica;
7. Ensaio de dureza;

O processo térmico de cementação foi dividido em algumas etapas até a obtenção dos resultados, sendo eles:

1. Preparação da amostra: cortar em pequenas partes.
2. Embutimento
3. Lixamento: até obter caráter espelhado.
4. Aquecimento: temperatura e tempo de exposição controlada.
5. Resfriamento (ar ambiente).
6. Análise microscópica

Ensaio de dureza são todos os processos de tratamento térmico (têmpera e recozimento) e termoquímico (cementação) passaram por testes de dureza e microscopia.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo de recozimento é empregado sobre matérias que apresentam elevada dureza, uma vez que após o tratamento, é possível dimensionar a redução obtida sobre o material a ser analisado.

Para quantificar a eficiência do tratamento térmico de recozimento, sobre o ferro fundido cinzento, foram realizados testes de dureza do material, quantificando amostras antes e depois do tratamento aplicado. O método de ensaio empregado foi o de dureza por ponta de diamante, com carga total de 150 kgf (Escala C - HRC). A Tabela 06 apresenta valores de dureza obtidos em cada ensaio, bem como a classificação da média empregada.

Tabela 06: Resultados de ensaio de dureza Rockwell em ferro fundido

Teste	Amostra sem Tratamento	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1	125	95	93	98
2	126	102	89	94
3	123	90	94	95
4	124	90	95	92
5	129	100	98	90
MÉDIA	125	95	94	94
DESVIO PADRÃO	2,3	5,54	3,27	3,03

Fonte: Próprio autor, 2025.

A amostra de ferro fundido cinzento sem o tratamento apresentou dureza média de 125 HRC, indicando um material com possível presença de tensões residuais e menor capacidade de deformação plástica. Esse comportamento é típico de peças que não passam por processos de alívio de tensões, podendo resultar em microestruturas mais rígidas e suscetíveis à fratura. Esses valores reforçam a importância de tratamentos térmicos adequados para melhorar a estabilidade dimensional e a ductibilidade do ferro fundido.

A análise comparativa entre as amostras com e sem tratamento revelou uma redução de 24% de dureza. A amostra com recozimento 1 resultou em dureza média de 95 HRC, enquanto as outras duas amostras apresentaram uma média de 94 HRC. A redução é diretamente proporcional ao aumento da ductibilidade e tenacidade do material, visto ser o principal foco do tratamento de recozimento.

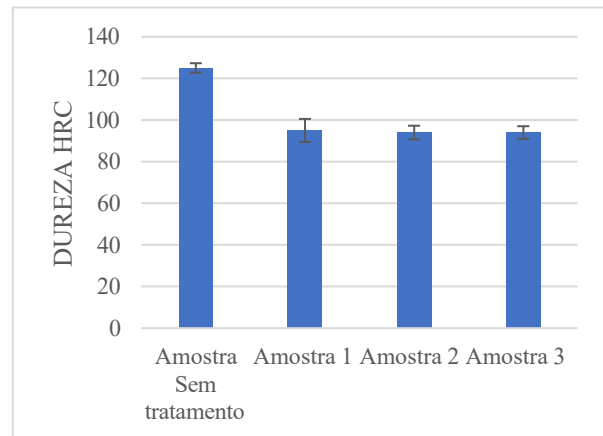
O valor médio obtido demonstra que os parâmetros adotados, como temperatura de austenitização, o tempo de permanência e a taxa de resfriamento foram adequados para conduzir o material a uma condição microestrutural mais estável. Essas condições favorecem a redução da dureza e, conseqüentemente, o aumento da ductibilidade, indicando que o tratamento térmico aplicado atuou de forma eficaz no alívio de tensões e na melhoria do comportamento mecânico do ferro fundido.

O Figura 12 apresenta o comparativo entre as diferentes condições do processo de recozimento, evidenciando os resultados obtidos em cada etapa da análise. Além disso, o gráfico ilustra o desvio padrão correspondente a cada conjunto de dados, permitindo uma avaliação mais precisa da variabilidade e consistência de resultados.

Essa apresentação facilita a interpretação do comportamento do material, ao longo do processo, destacando possíveis tendências, variações e dispersões nos valores medidos, o que contribui para uma análise mais robusta do desempenho térmico e estrutural do

processo de recozimento efetuado sobre o ferro fundido cinzento.

Figura 12: Comparativo Ferro Fundido sobre processo de recozimento

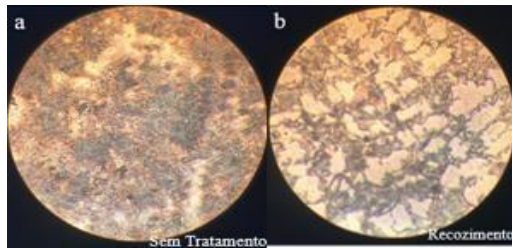


Fonte: Próprio autor, 2025.

A análise microestrutural do ferro fundido evidencia diferenças significativas entre o material antes e após o processo de recozimento, indicando claramente a influência da temperatura sobre a morfologia e a distribuição de grãos. Conforme a Figura 13, observa-se que o tratamento térmico promove alterações na estrutura interna do material, resultando em maior homogeneidade microestrutural e na redução de tensões internas. Essas modificações refletem diretamente nas propriedades mecânicas do ferro fundido, contribuindo para a melhoria da sua ductibilidade e estabilidade dimensional.

A Figura 13 (a) demonstra o material sem tratamento térmico, no qual se tem uma microestrutura homogênea, composta por perlita, com presença concentrada de cementita (região escura) alternada com pequenas quantidades de ferrita (região clara). A perlita é resultado da transformação euteitoide do aço, em que o carbono confere ao material elevada dureza e menor ductibilidade. A análise microscópica revela grãos pequenos e irregulares

Figura 13: Comparativo processo recozimento sobre ferro fundido: a) Sem tratamento e b) Recozimento



Fonte: Próprio autor, 2025.

Após o processo de tratamento térmico, a Figura 13 (b) demonstra mudança microestrutural. O aquecimento controlado do material até uma temperatura próxima à crítica, seguido por resfriamento controlado. Essa ação promoveu a difusão do carbono (cementita em ferrita), visto que esse processo resulta na dissolução da perlita e na formação da ferritina, apresentando uniformidade e grãos maiores. A ferrita, por ter baixo teor de carbono, apresenta menor dureza e maior ductibilidade. Com os resultados, a microscopia confirma a recristalização do material e homogeneização da ferrita, verificando os resultados obtidos no ensaio de dureza.

Os resultados dos testes de impacto nas amostras de ferro fundidos, antes e depois do recozimento, podem ser observados na Tabela 07. A comparação entre as duas condições permite avaliar os resultados empregados nas amostras de ferro fundido sobre o processo recozimento e sobre a amostra sem passar pelo princípio de tratamento.

Tabela 07 : Resultados de teste impacto antes e depois do Recozimento.

ANÁLISE	Ferro S. T.	Recozimento
Teste 1	8	8
Teste 2	3	4
Teste 3	10	9
MÉDIA	7	7
DESVIO PADRÃO	3,60	2,64

Fonte: Próprio autor, 2025.

Nos resultados, observa-se que as amostras analisadas antes e após o tratamento térmico, não apresentaram diferenças significativas nos valores de energia absorvida. Esse comportamento, contudo, não está em conformidade com a dureza, do qual indicam variações perceptíveis após o processo. Tal discrepância pode estar relacionada a fatores microestruturais, à heterogeneidade do material ou limitações do ensaio de impacto em detectar pequenas alterações de energia associadas às mudanças de dureza.

Após a análise desses resultados, observou-se que o pêndulo utilizado para o ensaio Charpy possui uma energia de ruptura de 300 J, e o ferro fundido cinzento normalmente apresenta energias de ruptura entre 2 a 10 J. Deste modo, o material apresenta níveis de energia absorvida tão baixos que ficam abaixo do limite mínimo de detecção do equipamento utilizado, impossibilitando a obtenção de um valor preciso para o ensaio.

Para materiais, como o ferro fundido, cuja tenacidade é naturalmente reduzida devido à presença da grafita lamelar, recomenda-se a utilização de um pêndulo de menor capacidade, especificamente até 25 J, a fim de emitir a leitura adequada de energia absorvida e garantir maior sensibilidade na avaliação do comportamento frágil do material.

Na sequência, foram analisadas as amostras após o tratamento térmico de têmpera. Os ensaios de dureza sobre o aço 1020 tiveram como objetivo comparar o comportamento do material antes e após o processo térmico, de modo a avaliar as alterações nas propriedades mecânicas decorrente do tratamento. Para isso, três amostras foram submetidas à têmpera com resfriamento em óleo, e os valores de dureza obtidos encontram-se apresentados na Tabela 08.

Tabela 08: Resultados de Ensaio de Dureza Rockwell após Têmpera por resfriamento a óleo

Teste	Amostra sem Tratamento	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1	85	99	98	97
2	90	96	100	98
3	99	97	97	94
4	95	98	98	98
5	90	97	98	91
MÉDIA	92	97	98	96
DESVIO PADRÃO	5,3	1,5	3,04	3,04

Fonte: Próprio autor, 2025.

O aço 1020, sem tratamento térmico, apresentou uma dureza média de 92 HRC. Esse resultado é característico de metais com baixa concentração de carbono, cuja microestrutura predominante é composta por ferrita e perlita. Essa combinação microestrutural confere ao aço boa tenacidade e elevada ductibilidade, porém resulta em menor resistência mecânica e dureza, quando comparado a aços com maior teor de carbono ou submetidos a tratamentos térmicos de endurecimento.

Após a realização do processo de têmpera em óleo, verificou-se um aumento significativo na dureza de todas as amostras, confirmando a eficiência do tratamento térmico. O acréscimo médio aproximado de 5% nos valores de dureza evidencia a transformação

microestrutural ocorrida durante o resfriamento rápido. A obtenção de valores médios superiores a 97 HRC indica a formação de martensita, uma fase caracterizada por sua alta dureza e resistência mecânica, resultante da rápida transformação da austenita durante o processo térmico de têmpera.

A Tabela 09 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de dureza realizados nas amostras de aço 1020, tanto antes quanto após o tratamento térmico. Essa comparação permite observar a variação nos valores de dureza, possibilitando uma avaliação da influência do meio de resfriamento sobre a transformação microestrutural e, consequentemente, sobre as propriedades mecânicas do material.

Tabela 09: Resultados de Ensaio de Dureza Rockwell após Têmpera por resfriamento a Salmoura

Teste	Amostra sem Tratamento	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1	85	103	102	101
2	90	101	102	101
3	99	102	104	104
4	95	100	100	105
5	90	100	102	104
MÉDIA	92	101	102	103
DESVIO PADRÃO	5,35	4,15	2,12	1,87

Fonte: Próprio autor, 2025.

Conforme apresentado na Tabela 08, o aço 1020, sem o processo de tratamento térmico, apresentou dureza de 92 sobre a média dos testes, sendo valor característico de um material com microestrutura gerenciada por ferrita e perlita, conferindo ao aço boa ductibilidade e facilidade, entretanto com resistência mecânica limitada.

Após o processo de têmpera por salmoura, observa-se o aumento nos valores, promovendo 11% de dureza média sobre a amostra sem tratamento. A amostra 3 ocorreu o aumento mais expressivo, indicando uma taxa de resfriamento mais elevada e eficaz na transformação microestrutural.

A ação do carbono é fundamental e decisiva para o endurecimento do material, quanto mais rápido acontecer

o processo de resfriamento, maior a probabilidade de transformar austenita em martensita sobre toda a área da peça, uma vez que o aumento da dureza, no processo de salmoura, está interligado à agressividade e velocidade no processo de resfriamento. Sob o aspecto geral, os resultados comprovam a eficácia da têmpera em salmoura sobre a modificação das propriedades mecânicas.

A Tabela 10 apresenta os valores médios de dureza obtidos sobre o ensaio realizado no aço 1020, submetido a diferentes condições, tendo passado por têmpera à água e uma referência de amostra sem tratamento térmico.

Tabela 10: Resultados de Ensaio de Dureza Rockwell após Têmpera por resfriamento a Água

Teste	Amostra sem Tratamento			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	85	99	96	98
2	90	90	96	97
3	99	98	97	99
4	95	93	96	95
5	90	97	96	95
MÉDIA	92	95	96	97
DESVIO PADRÃO	5,35	3,96	0,89	2,34

Fonte: Próprio autor, 2025.

O processo de têmpera por meio de resfriamento em água apresentou valores superiores ao material sem passar pelo processo, atingindo 4% de evolução sobre o resultado de dureza em relação ao aço 1020 destituído de tratamento. A variação entre as amostras de água pode estar associada a fatores como temperatura do líquido e agitação, que afetam a extração de calor da amostra. A amostra três indica uma média mais eficiente quanto a dureza empregada. De forma geral, os resultados demonstram um aumento eficaz na resistência mecânica do aço 1020, embora essa ação tende a diminuir a tenacidade.

A Figura 14 apresenta o comparativo entre os diferentes tipos de tratamento térmico de têmpera,

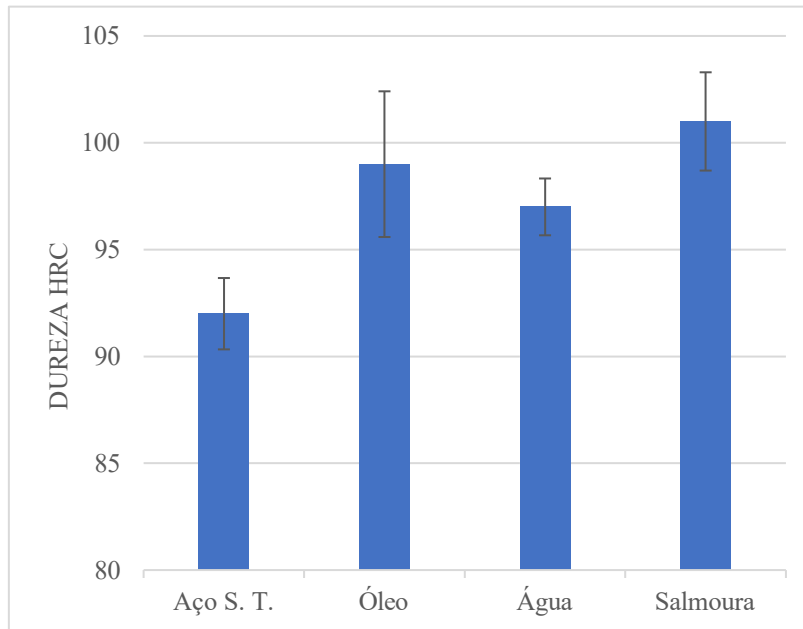
considerando diferentes meios de resfriamento e suas respectivas variações entre os pontos avaliados, demonstrando média e desvio padrão obtido em cada um deles. A análise dos resultados evidencia uma evolução significativa, nas propriedades do material quando submetida ao tratamento térmico, especialmente sobre o aumento da dureza.

Comparando os meios de resfriamento, observa-se que houve um ganho aproximado de 11% no desempenho por resfriamento a salmoura quando comparado ao estado inicial do material, demonstrando boa eficiência no endurecimento sem provocar variações bruscas na estrutura. No processo a água, verificou um

aumento de 4%, apresentando resultados satisfatórios, porém com menor impacto quanto à salmoura. Já a têmpera em óleo resultou em 5% de aumento, indicando melhora na dureza.

Os resultados reforçam que a escolha do meio de resfriamento influencia diretamente tanto nas propriedades mecânicas quanto na uniformidade do processo.

Figura 14: Comparativo entre os diferentes processos de Tratamentos de Têmpera



Fonte: Próprio autor, 2025.

A análise microscópica das amostras de aço 1020 sobre os diferentes tipos de tratamento térmico, conforme a Figura 15, identificou alterações significativas na faixa microestrutural, uma vez que este aço possui baixo teor de carbono e apresenta quantidade limitada de carboneto de ferro (cementita), obtendo a ferrita como microestrutura predominante.

Na amostra sem o tratamento térmico, como mostra a Figura 16 (a), observa-se uma microestrutura composta por ferrita, com aglomerados de perlita. As regiões claras predominam a ferrita, enquanto as escuras a perlita, cuja formação é a junção de ferrita e cementita. São estruturas típicas de aço hipoeutetóides, apresentando grãos equiaxiais e boa ductibilidade. A baixa porcentagem de carbono, contribuiu para menor fração de cementita, resultando em material macio e como resistência mecânica baixa.

Após a têmpera em óleo, na Figura 15 (b), foi possível observar uma mudança dos grãos, uma vez que o resfriamento rápido forneceu a formação de martensita parcial, sendo evidenciada por regiões aciculares mais escuras, obtendo áreas claras de ferrita remanescente. Como o óleo possui resfriamento intermediário, o processo de transformação sobre austenita não foi completo, mantendo assim parte da estrutura original. Os contornos dos grãos tornaram-se menos visíveis devido à formação de martensita.

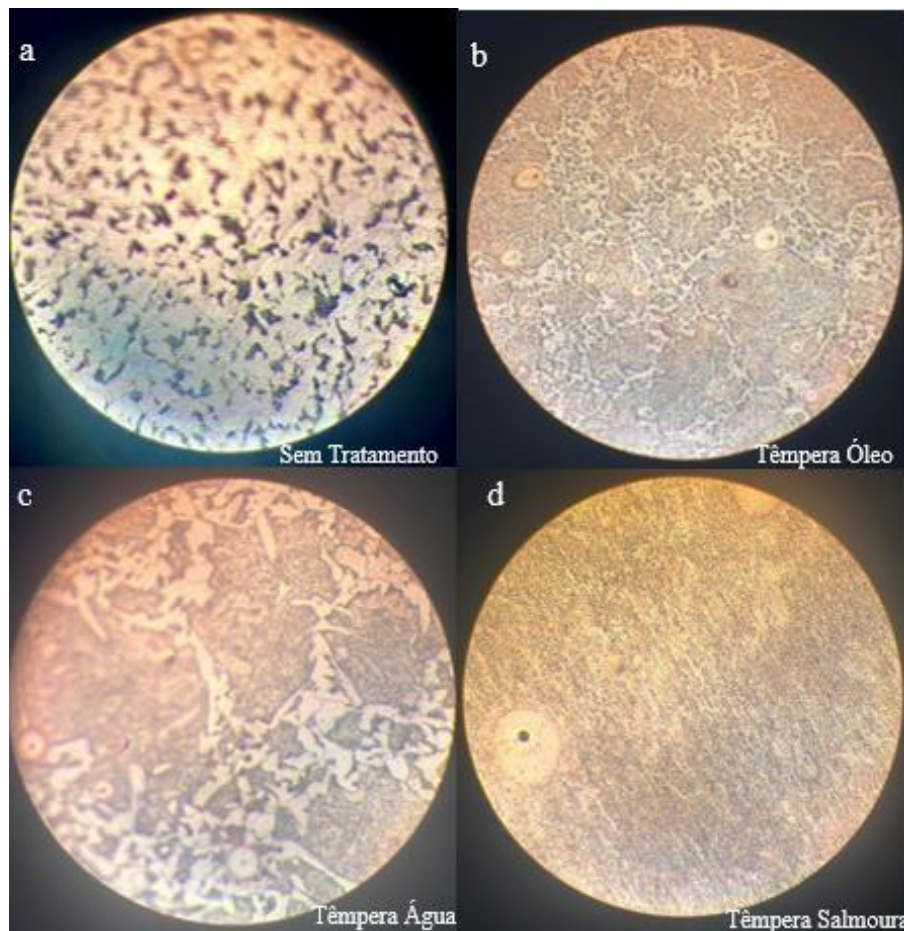
Por outro lado, no processo de têmpera em água, observa-se na Figura 15 (c) que a taxa de resfriamento foi menor, resultando em uma formação parcial da martensita na ferrita e cementita. Estruturas aciculares mais finas e densamente distribuídas foram apresentadas, indicando maior presença de martensita em relação à ferrita. O aumento da martensita refletiu maior dureza e resistência mecânica. Esse rápido resfriamento impediu a difusão

completa do carbono. A forma morfológica dos grãos apresenta ser mais refinada e alongada, isso por consequência da transformação rápida.

No processo de têmpera em salmoura, na Figura 15 (d), o resfriamento foi ainda mais severo devido a adição de sal na água, uma vez que proporcionou melhor transferência térmica devido à solução salina. A

microestrutura predominante foi martensita, apresentando pouca porcentagem de ferrita ou perlita. O resultado empregado demonstra que mesmo com aço de baixo teor de carbono, considerando a fragilidade, a salmoura é capaz de promover uma transformação quase completa da austenita.

Figura 15: Comparativo microestrutura do processo de têmpera: a) Sem tratamento, b) Têmpera em óleo, c) Têmpera em água e d) Têmpera em salmoura



Fonte: Próprio autor, 2025.

Em aspecto geral, observa-se que o aumento da taxa de resfriamento promoveu uma transformação microestrutural significativa, convertendo a mistura original de ferrita e perlita em martensita. Essa mudança resulta em um material substancialmente mais duro, devido à elevada supersaturação de carbono característica da martensita.

A análise do aço 1020 foi realizada após diferentes tempos de exposição ao carvão ativo no processo de cementação, sendo aplicado teste de dureza, podendo assim avaliar o impacto do tratamento termoquímico sobre as propriedades mecânicas do material. Os tempos de exposição e resultados obtidos podem ser observados na Tabela 11. A Tabela apresenta de forma organizada a relação entre o período de tratamento e as alterações nas

propriedades do material, permitindo uma interpretação clara da influência do tempo sobre a difusão de carbono e o desempenho final das amostras.

Tabela 11: Resultados de Ensaio de Dureza Rockwell no processo de cementação sobre diferentes tempos de aquecimentos

Teste	Amostra sem Tratamento	15 Min	30 Min	45 Min	01h30	01h45	2h
1	71	82	87	88	89	87	88
2	72	76	84	79	80	82	82
3	74	74	83	84	82	81	80
4	76	76	79	80	82	83	82
5	68	74	76	80	80	81	83
MÉDIA	72,2	76,4	81,8	82,2	82,6	82,8	83
DESVIO PADRÃO	3,03	3,29	4,32	1,14	3,71	2,49	3

Fonte: Próprio autor, 2025.

A dureza média do aço sem tratamento atingiu 72,2 HRC, o que é esperado para aço de baixo teor de carbono, após iniciar a exposição a quente, a dureza manteve uma constante de crescimento, atingindo valores em média de 81,4. Com relação a média dos resultados, obteve um aumento superior a 11%, em relação a dureza do aço em tratamento. Este aumento indica que o material obteve boa absorção de carbono sobre a superfície da peça, formando uma camada leve endurecida.

Foi possível visualizar que a dureza obteve aumento progressivo sobre os testes, pois maior foi o tempo de exposição, maior foi a dureza obtida na superfície do corpo de prova. Após 01h30 de exposição, a dureza começou a estabilizar, com um pequeno aumento adicional, ao longo do tempo. Isso sugere que a dureza ocorreu de forma mais expressiva até os primeiros 45 minutos.

A partir do ponto de estabilidade, a cementação alcançou um nível de saturação, em que a faixa de aumento fica menor, ao indicar que o processo de cementação atingiu valores próximos à difusão do carbono na superfície.

Fatores como a composição do carvão ativo, a temperatura e o tempo de exposição influenciam

diretamente o resultado final do corpo de prova, uma vez que a homogeneidade do material e a precisão dos ensaios de dureza podem gerar variações significativas nos resultados obtidos. A composição do carvão ativo determina a taxa de liberação de carbono durante o processo, afetando a profundidade e a uniformidade da camada cementada.

Por outro lado, a temperatura e o tempo, de aquecimento controlam a difusão do carbono na superfície do aço, sendo determinantes para alcançar o equilíbrio entre dureza superficial e tenacidade do núcleo. Dessa forma, o controle rigoroso desses parâmetros é essencial para garantir a repetibilidade dos ensaios e a qualidade metalúrgica sobre o material analisado.

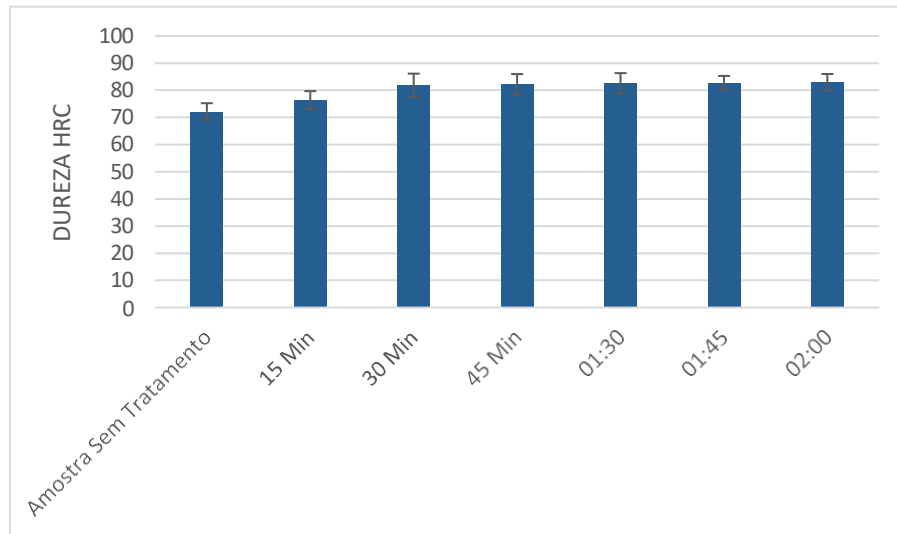
A evolução da dureza aconteceu de forma crescente, uma vez que quanto maior o tempo de exposição, maior a dureza empregada. Nos primeiros 15 minutos, obteve um avanço próximo a 6%, aos 30 minutos avançou 13% em relação ao aço sem tratamento e aos 45 minutos 14%.

Após 1h30 iniciou a saturação do carbono, onde obteve aumento de 14,3%, após esse período o aumento foi de 14,7 e 14,9 % representando as duas últimas faixas de tempo respectivamente.

A Figura 16 demonstra o comparativo da dureza após o processo de cementação, comparando as amostras sobre diferentes tempos de exposição, evidenciando a

importância do controle preciso para equilibrar o aumento de dureza.

Figura 16: Resultados de Ensaio de Dureza para Cementação com diferentes períodos de tempos de exposição

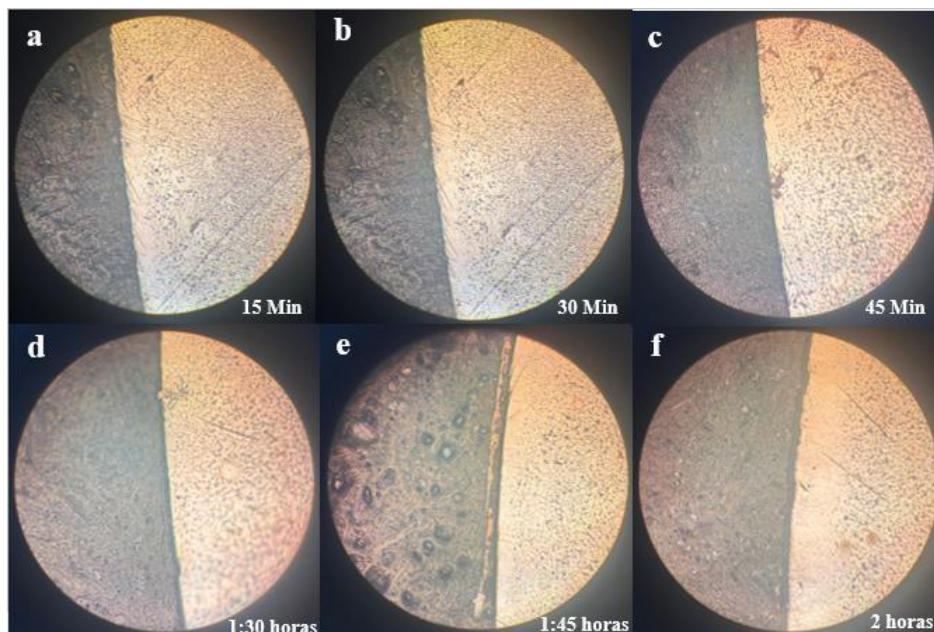


Fonte: Próprio autor, 2025.

A Figura 17 demonstra a microestrutura do aço 1020, após o processo de cementação, que consiste no aquecimento do material submerso em carvão ativo para promover o enriquecimento superficial de carbono. Com resultado, observa-se a formação de uma camada externa

mais dura e resistente ao desgaste, enquanto o núcleo permanece com maior ductibilidade, característica essencial para suportar esforços mecânicos sem sofrer fratura.

Figura 17: Comparação microscópica sobre os diferentes tempos de exposição no processo de cementação: a) 15 minutos, b) 30 minutos, c) 45 minutos, d) 1:30 horas, e) 1:45 horas e f) 2 horas



Fonte: Próprio autor, 2025.

As amostras iniciais (15 e 30 minutos) revelaram microestruturas com grãos equiaxiais, com contornos bem definidos, obtendo fases como ferrita (clara e macia) e perlita (fase escura composta por perlita e cementita). A distribuição de dureza ainda inferior as demais é característica do início do processo de cementação, uma vez que o aumento da dureza está interligado a difusão do carbono na superfície.

Na figura 17 podemos observar que a camada cementada não aparece nitidamente em nenhuma das amostras, provavelmente porque a camada é muito fina. É possível que a difusão superficial ocorreu, mas não o suficiente para produzir diferenças micrográficas perceptíveis no aumento do microscópio óptico.

A saturação microestrutural após 01:30 de exposição identificou um rendimento decrescente na dureza, uma vez que o carbono atinge o ponto máximo superficial para formar martensita. Prolongar o tempo de exposição poderá apenas expandir a camada de penetração carbônica, porém a dureza não haverá mudanças.

CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados experimentais e nas análises microestruturais, foi possível comprovar a eficácia dos tratamentos térmicos e termoquímicos na modificação e otimização das propriedades mecânicas dos metais ferrosos.

O tratamento de recozimento aplicado ao ferro fundido cinzento, apresentou redução significativa quanto as medições apresentadas de dureza, promovendo redução de 24%, demonstrando o alívio de tensões internas e o aumento da ductibilidade do material. A transformação esta ligada à difusão do carbono e à recristalização da microestrutura, resultando em grãos maiores e mais homogêneo de ferrita, o que tende a favorecer a estabilidade e resistência ao impacto.

O ensaio de impacto Charpy, aplicado ao ferro fundido cinzento, apresentou resultados insatisfatórios, com valores baixos para amostras com e sem recozimento. Os resultados indicam que, embora o tratamento tenha promovido uma diminuição da dureza, não alterou de

forma significativa a morfologia dos flocos de grafita presentes na matriz do ferro fundido. Dentre os fatores, o uso do pêndulo de alta capacidade energética limitou a sensibilidade do equipamento para amostras de baixa absorção, identificando que a fragilidade é intrínseca ao tipo de liga.

Nos processos de têmpera realizados sobre o aço 1020, observou o efeito direto da taxa de resfriamento na formação microestrutural sobre martensita. O resfriamento a óleo demonstrou dureza intermediária, indicando formação parcial de martensita. O resfriamento em água promoveu aumento da dureza. O resfriamento em salmoura, proporcionou a transformação quase completa da austenita em martensita, atingindo valores elevados de dureza, porém com maior fragilidade. Os resultados obtidos comprovam a importância do controle dos parâmetros de temperatura, tempo de exposição e meio de resfriamento para equilibrar a dureza e tenacidade, uma vez que o processo em água obteve 4% de aumento, óleo 5% e salmoura 11% em relação a dureza do aço sem o tratamento.

No tratamento termoquímico de cementação observou-se o aumento progressivo do tempo de exposição ao meio carburante resultou em elevação gradual da dureza superficial até o ponto de saturação, demonstrando a difusão efetiva do carbono e a formação da martensita no aço. Após 1:30 de exposição, observou estabilidade nos valores de dureza, indicando que a camada cementada atingiu seu limite máximo de enriquecimento superficial, obtendo uma média de 11%, uma vez que em relação a última amostra, o ganho de dureza aproximou a 15%.

De modo geral, as análises comprovam que a aplicação controlada dos tratamentos térmicos e termoquímicos permite ajustar as propriedades dos metais ferrosos. Enquanto o recozimento favorece a ductibilidade e alívio de tensões, o processo de têmpera e cementação aumentam a dureza e a resistência ao desgaste. Assim, o estudo reafirma a importância da engenharia de tratamentos térmicos e termoquímicos como ferramenta

para aprimoramento estrutural e funcional de ligas metálicas utilizadas em ambientes industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chiaverini, V. *Tecnologia Mecânica: Estrutura e propriedades das ligas metálicas*. Vol. 2, Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1986.
- Anazawa, R. M.; Abdalla, A. J.; Hashimoto, T. M.; Pereira, M. S. (2012). Estudo comparativo das propriedades mecânicas em aços 4340 e 300 M submetidos a tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v.31, n.1-2, p.32-37. doi: <http://dx.doi.org/10.17563/rbav.v31i1-2.918>
- Novikov, I. *Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ; 1994
- Callister, W. D.; Rethwisch, D. G. *Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.
- Silva, João. *Tratamentos térmicos dos metais: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora Técnica Industrial, 2019.
- Martins, Carlos A. *Tratamentos térmicos em ligas metálicas: teoria e prática industrial*. Belo Horizonte: TecnoMetal Editora, 2020.
- Garcia, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C. A. *Ensaaios dos Materiais*, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2000.
- Freitas, B. M.; Vasconcelos, S. M.; Macedo Neto, J. C. (2016). Beneficiamento do Aço SAE 8640 sob Tratamentos Térmicos. In: *Anais do CONTECC - Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*, Foz do Iguaçu
- Ferreira, Lucas M. *Fundamentos dos tratamentos térmicos: aplicações e efeitos nas propriedades dos metais*. Rio de Janeiro: Editora Metalurgia Moderna, 2021.
- Nogueira, R. C.; Abdalla, A. J.; Hashimoto, T. M.; Pereira, M. S. (2015). Análise microestrutural de um aço AISI 4350 submetido a tratamentos térmicos para a formação de bainita. *Revista Brasileira de Vácuo*, v.34, n.1, p.44-48. doi: [10.17563/rbav.v34i1.959](http://dx.doi.org/10.17563/rbav.v34i1.959)
- Oliveira, Mariana S. *Tratamentos térmicos e termoquímicos: fundamentos e aplicações industriais*. Curitiba: Editora Ciência dos Materiais, 2022.
- Silva, R. P.; Lima, E. S.; Menezes, M. J. Análise comparativa da cementação e têmpera no aço AISI 1020. *Revista Científica da FATEC*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 78-84, 2021.
- Moura, J. L.; Costa, A. M.; Texeira, R. M. Efeito da cementação nas propriedades mecânicas do aço AISI 8620. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, São Paulo, v. 42, n. 2, p. 112-119, 2020.
- Fernandes, L. H.; Souza, M. C.; Ribeiro, F. R. Influência do revenido nas propriedades mecânicas do aço temperado AISI 1045. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 1-9, 2018.
- Costa, Renata P. *Avanços em tratamentos térmicos e termoquímicos: eficiência e aplicações industriais*. São Paulo: Editora Técnica Metalúrgica, 2023.
- Santos, Eduardo F. *Processos térmicos aplicados na indústria: durabilidade e desempenho de ligas metálicas*. Porto Alegre: Editora Engenharia Industrial, 2021.
- Vitor, Everaldo. *Os tratamentos térmicos e termoquímicos, além de promover a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais metálicos*. São Paulo: Os tratamentos térmicos e termoquímicos, além de promover a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais metálicos, 2021.
- Chiaverini, V. *Tratamento Térmico das Ligas Metálicas*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2008.
- Silva, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto. *Aços e ligas especiais*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 646 p.
- Callister, William D.; Rethwisch, David G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10. ed. New York: Wiley, 2018.
- Chiaverini, Vicente. *Tratamento térmico das ligas metálicas*. São Paulo: Ed. Blucher, 2004.
- Diegel, Olaf; Hilgers, Helmut; Kamp, Peter. *Metallurgy for the Non-Metallurgist*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2015.
- Borges, J. R. *Tratamentos térmicos dos aços: fundamentos e aplicações*. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2016.
- Wang, L.; Speer, J. G. *Quenching and Partitioning Steel Heat Treatment*. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, v. 2, n. 4, p. 268–281, 1 ago. 2013.
- Clarke, A. J., et al., *Perspectives on Quenching and Tempering 4340 Steel*. *Metallurgical and Materials Trans. A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2020.
- Nunes, Genilton José. *Tratamento térmico dos aços*. Curitiba: Editora CRV, 2018.
- Brito, Carlos Magno Gomes de. *Influência dos tratamentos térmicos de recozimento pleno e normalização na microestrutura e propriedades mecânicas de aços com baixo e alto teor de carbono*. 2017. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- Oliveira, C. A. S. *Têmpera Direta de Aços Baixa Liga: Aspectos Cinéticos, Microestruturais e de Propriedades Mecânicas*. Tese de Doutorado de

- Engenharia Metalúrgica, UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 1994.
29. Colpaert, H.; Silva, A. L. C. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
 30. Golçalves, Natália Garcia. estudo da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320. Jaraguá do Sul: Instituto Federal de Santa Catarina, 2017.
 31. Leitão, C. J; Mei, P. R; Libardi, R. Efeitos da cementação e da nitretação no custo e na qualidade de engrenagens produzidas com aços ABNT 4140 e 8620. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, 2012.
 32. Costa, A. M. da; SOUSA, D. L. C. de. Cementação em aço: análise dos processos sólido e líquido. Revista Científica da FAMINAS, v. 13, n. 2, p. 55–64, 2017.
 33. Diniz, Anselmo Eduardo de Carvalho. Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo: Artliber, 2011.
 34. Minayo, M. C. Pesquisa social: teoria, método e criatividade. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.