



Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG
Curso de Engenharia Mecânica

JORDANIO SILVA NUNES
LUCAS RODRIGUES FARIA

ESTUDO COMPARATIVO DE DUREZA EM AÇOS APÓS A APLICAÇÃO DE
TRATAMENTOS TÉRMICOS

Publicação Nº 05

Goianésia - GO
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

NUNES, JORDANIO SILVA; FARIA, LUCAS RODRIGUES

Estudo comparativo de dureza em aços após a aplicação de tratamentos térmicos [Goiás] 2023, 18P, 297 mm (ENG/FACEG, Bacharel, Engenharia Mecânica, 2023).

ARTIGO – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Mecânica.

- | | |
|----------------|--------------------|
| 1. SPT | 2. SPT-T |
| 3. Correlações | 4. Solos porosos |
| I. ENM/FACEG | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NUNES, J. S Estudo comparativo de dureza em aços após a aplicação de tratamentos térmicos, Publicação XX 2023/2 Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 18p. 2023.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jordanio Silva Nunes, Lucas Rodrigues Faria

TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Estudo comparativo de dureza em aços após a aplicação de tratamentos térmicos.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica ANO: 2023

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.

DocuSigned by:

C6910F103A0B430...
Jordanio Silva Nunes
CEP 76386-085 Goianésia/GO – Brasil

DocuSigned by:
LUCAS RODRIGUES FARIA
D738FC4F88DF49F...
Lucas Rodrigues Faria
CEP 76388-495 Goianésia/GO – Brasil

**JORDANIO SILVA NUNES
LUCAS RODRIGUES FARIA**

**ESTUDO COMPARATIVO DE DUREZA EM AÇOS APÓS A APLICAÇÃO DE
TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Publicação Nº 05

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

Aprovados por:

DocuSigned by:



3ACDC1EBA5B84A1...

Dra. Marines C.C.B. Gomes, Dra., FACEG

(ORIENTADOR)

DocuSigned by:

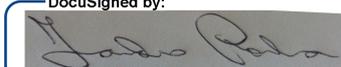


B04977ADA239495...

Dra. Lauriane Gomes Santin, Dra., FACEG

(EXAMINADOR INTERNO)

DocuSigned by:



AD7CE93344F3473...

Me Ivandro José Freitas Rocha, Me, FACEG

(EXAMINADOR INTERNO)

**Goianésia - GO
2023**

ESTUDO COMPARATIVO DE DUREZA EM AÇOS APÓS A APLICAÇÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Jordanio Silva Nunes¹
Lucas Rodrigues Faria²
Dra. Marines C.C.B. Gomes

RESUMO

Segundo dados do Instituto Aço, o Brasil possui uma capacidade instalada de fabricação de 34,1 milhões de toneladas por ano de aço bruto, emprega mais de 126.000 colaboradores, é o 5º maior exportador líquido de aço e exporta para mais de 100 países produzindo um saldo comercial de U\$ 6,0 bilhões de dólares, estes dados mostram o potencial deste mercado frente a outros setores. A produção e manufatura do aço em geral é onerosa e reflete muito no valor do produto final. Como o setor passa por retração, afetando diretamente nos custos, trabalhar suas propriedades mecânicas através de processos de tratamento térmico, se torna de suma importância. O objetivo deste trabalho é realizar testes comparativos de dureza entre amostras de aços SAE 1020, 1045 e ASTM A36 após passarem pelos tratamentos térmicos. Neste artigo exploraremos os efeitos de três tratamentos térmicos comuns que influenciam na dureza do aço: recozimento, têmpera e normalização. Foram realizados os tratamentos térmicos citados e ensaios de dureza Rockwell superficial em todas as amostras, além da análise microscópica, verificando-se a microestrutura obtida pela realização desses tratamentos e comparando-se com uma amostra padrão previamente estabelecida; Comprovou-se, através da análise dos dados obtidos, que ocorreu o aumento médio de 206% na dureza das amostras que foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera e uma redução média de 28% na dureza das amostras submetidas aos tratamentos de recozimento e normalização. Foi realizada análise microscópica para visualização da mudança estrutural sofrida na estrutura cristalina. As amostras foram previamente preparadas para realização dos ensaios de dureza.

Palavras-chave: Têmpera. Recozimento. Normalização. Estrutura Cristalina

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Instituto Aço, o Brasil possui uma capacidade instalada de fabricação de 34,1 milhões de toneladas por ano de aço bruto, emprega mais de 126.000 colaboradores, é o 5º maior exportador líquido de aço e exporta para mais de 100 países produzindo um saldo comercial de US\$ 6,0 bilhões de dólares, A produção e manufatura do aço em geral é custosa e reflete muito no valor do produto final. Como o setor passa por retração, afetando diretamente nos custos, trabalhar suas propriedades mecânicas através de processos de tratamento térmico, se torna de suma importância; Os materiais ferrosos encontrados no comércio, na maioria das vezes, antes de sua utilização final, são submetidos a diferentes tratamentos térmicos ou termoquímicos. Estes tratamentos podem ser descritos como, procedimentos utilizados para modificação da estrutura interna ou obtenção de nova formação estrutural do material (Instituto Aço Brasil, 2022).

O tratamento térmico de têmpera consiste num resfriamento brusco do material, após ter atingido a temperatura de austenização. Na têmpera obtém-se a estrutura martensita, com a finalidade aprimorar as propriedades mecânicas dos metais. Assim podendo aumentar a dureza, de maneira prática, de modo que proporcione uma maior resistência ao desgaste, à abrasão e dessa forma aumentando sua durabilidade e confiabilidade na conclusão de projetos; O recozimento é um tratamento térmico que envolve aquecer um material a uma temperatura específica e, em seguida, resfriá-lo de forma controlada. Esse processo visa alterar a estrutura cristalina do material, eliminando as tensões internas e restaurando suas propriedades originais. O recozimento é um procedimento utilizado em diversos setores industriais, como a metalurgia, engenharia, fabricação de peças e até mesmo na indústria alimentícia. Ele desempenha um papel crucial na melhoria das propriedades dos materiais, tornando-os mais maleáveis, dúcteis e adequados para diversos fins; A normalização é um tratamento térmico que consiste elevar a temperatura acima da temperatura de austenização e realizar o resfriamento ao ar livre ou com ventilação forçada cuja a função é diminuir as tensões decorrentes dos processos de fundição e conformação mecânica a quente ou a frio; Serve ainda para: melhorar a ductilidade; ajustar o tamanho de grão; reduzir a dureza; produzir uma estrutura definida; regular a textura bruta de fusão. Ou seja, a normalização consegue eliminar os variados defeitos resultantes de outros tratamentos que o material foi submetido. Isso permite uma estrutura mais fina e, por consequência, propriedades mecânicas levemente superior em comparação ao tratamento térmico de recozimento (COLPAERT, 2008).

O propósito principal deste estudo foi realizar testes comparativos de dureza em amostras dos aços SAE 1020, 1045 e ASTM A36, tanto antes quanto após serem submetidos aos tratamentos térmicos previamente mencionados. A etapa inicial envolveu a criteriosa seleção e preparação das amostras, abrangendo os três tipos de aço em questão: SAE 1020, SAE 1045 e ASTM A36. Os ensaios experimentais foram conduzidos nas instalações do centro tecnológico da Faculdade Evangélica de Goianésia, onde foram implementadas as etapas cruciais para a análise da dureza das amostras. Destaca-se que este trabalho adota uma abordagem metodológica que se caracteriza simultaneamente como pesquisa bibliográfica e de campo. Essa abordagem é respaldada pela utilização abrangente de diversos materiais de pesquisa, tais como livros, artigos, teses, sites, entre outros recursos, consolidando assim a robustez e a abrangência da metodologia empregada.

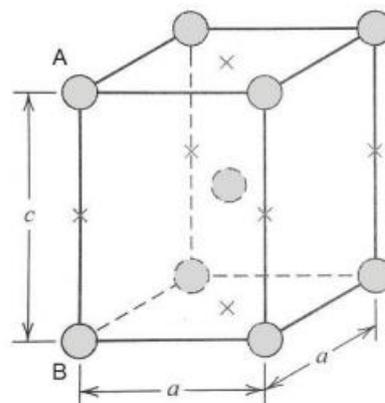
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ferro puro, ao ser aquecido, apresenta mudanças em sua estrutura cristalina antes de se fundir. À temperatura ambiente, a forma estável, chamada ferrita, ou ferro (α), apresenta uma estrutura Cúbica de Corpo Centrada (CCC). A 912°C a ferrita apresenta uma transformação polimórfica passando a austenita, ou ferro gama (γ), apresentando uma estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC). A austenita persiste até aproximadamente 1394°C, temperatura em que a austenita CFC reverte novamente a uma fase CCC, conhecida como ferrita delta (δ), e que finalmente se funde a 1538°C. A ferrita (δ) é virtualmente a mesma que a ferrita (α), exceto pela faixa de temperaturas em que cada uma existe, pois a ferrita (δ) é estável somente em temperaturas elevadas (CALLISTER, 2015).

Como visto, existem algumas possibilidades de microconstituintes nos aços, há várias formas de modificar sua composição, uma delas é pelo tratamento térmico que, quase sempre está ligado a mudança de microconstituinte e com isso a mudança da estrutura cristalina; É necessário entender que as transformações cristalinas resultam em mudanças nas propriedades térmicas e mecânicas do material, além de alterações volumétricas e de solubilidade, o que acarreta deformações e tensões residuais internas no aço (BORTOLETO, 2010).

A formação da martensita consiste em um mecanismo de cisalhamento e não de difusão, a inexistência de difusão se deve ao fato da martensita se formar somente quando, no resfriamento, uma determinada temperatura de transformação da martensita superior (M_s) é atingida. O início da formação da martensita é instantâneo e a quantidade de martensita formada cresce à medida que a temperatura diminui (CHIAVERINI, 2008); O carbono tem grande efeito sobre a dureza da martensita, quanto maior a porcentagem de carbono no aço, mais aumenta sua dureza. Esta relação é devida sua estrutura Tetragonal de Corpo Centrado (TCC), mostrado na Figura 1. A estrutura é obtida com o resfriamento rápido e em temperaturas inferiores a M_s , esta temperatura depende do tipo do aço de sua concentração de carbono e elementos de ligas, onde não há tempo suficiente para a difusão do carbono, levando a supersaturação de carbono e a distorção do reticulado cristalino pela formação da estrutura TCC. A estrutura martensítica está associada ao surgimento de tensões internas que restringem a movimentação das discordâncias, o que leva a um aumento de resistência mecânica (BERRAHMOUNE, 2006).

Figura 1 – Estrutura Cristalina Tetragonal de Corpo Centrado (TCC)



Fonte: Adaptado de Callister (2015).

O átomo de carbono em solução intersticial no ferro α , transforma o reticulado na sua vizinhança, em reticulado tetragonal, ao invés de cúbico. A forma tetragonal se deve ao fato de que os átomos de carbono se posicionam na aresta do cubo entre os átomos de ferro localizados no vértice. A Figura 1 ilustra o posicionamento do centro dos átomos de carbono (marcados com X), o resultado dessa movimentação atômica é um aumento da distância entre os átomos A e B de ferro e uma diminuição de espaço nas direções transversais a . A variação dos parâmetros do reticulado cubico transforma-o em tetragonal, essa variação é acentuada pelo aumento do teor de carbono (CHIAVERINI, 2008); Na transformação da estrutura austenítica CFC para a estrutura da martensita TCC, ocorre uma expansão no volume ocupado pelo material (cerca de 4%) que em parte é provocada pela presença do átomo de carbono deslocado na estrutura (BORTOLETO, 2010); A estrutura cristalina TCC é simplesmente um CCC que foi alongado ao longo de sua dimensão em c como mostra a Figura 1 (CALLISTER, 2015).

De acordo com a NBR - NM 136 (NBR, 1997), define-se tratamento térmico como a operação ou o conjunto de operações (no caso de tratamento completo) através dos quais se submete o aço, em estado sólido, a um ou vários ciclos térmicos. O meio em que se colocam as peças no intervalo de tempo destas operações pode modificar, a composição química das camadas superficiais da peça. A finalidade de tratamento térmico é a de conferir ao aço propriedades particulares, adequadas à sua transformação ou emprego posterior.

A microestrutura do aço está diretamente ligada às suas propriedades, o emprego dos tratamentos térmicos permite modificá-las com a finalidade de alterar uma ou mais propriedades. Dentre os tratamentos térmicos existentes, o recozimento tem como objetivo remover tensões internas geradas por processos anteriores (tratamentos mecânicos, soldagem, forjamento, entre outros); Diminuindo então a dureza e melhorando a usinabilidade do aço. O tratamento térmico de recozimento consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica durante tempo necessário e suficiente para solubilização do carbono ou dos elementos de liga no ferro gama, seguido de resfriamento lento (CHIAVERINI, 2008).

O processo de normalização é indicado na obtenção de microestruturas homogêneas e refinadas, melhorando a resistência e a tenacidade. Em alguns casos, para se obter uma resposta uniforme a outros tratamentos é necessário partir de uma estrutura uniforme, obtida através de normalização. O ciclo térmico da normalização consiste no aquecimento em temperaturas em que há a completa austenitização, seguido de resfriamento ao ar (COLPAERT, 2008).

Dureza: A dureza é uma propriedade mecânica, reflete a resistência de um material à deformação plástica, indicando sua capacidade de resistir a arranhões, cortes ou penetração. Essencial para avaliar a adequação de materiais em diversas aplicações, a dureza está interligada a características mecânicas como resistência, tenacidade e elasticidade. A medição da dureza é realizada por ensaios específicos que aplicam carga à superfície do material, gerando impressões mensuradas para determinar a dureza. Diversas escalas, como Brinell, Vickers, Rockwell, Shore e Knoop, são empregadas, cada uma adaptada a diferentes materiais e condições de teste. A importância da dureza se reflete na resistência e durabilidade de materiais em várias aplicações, incluindo engenharia, construção e indústrias. Materiais com alta dureza são cruciais em ferramentas, componentes automotivos e peças de precisão, garantindo desempenho e vida útil em ambientes de desgaste intenso (CALLISTER, 2015).

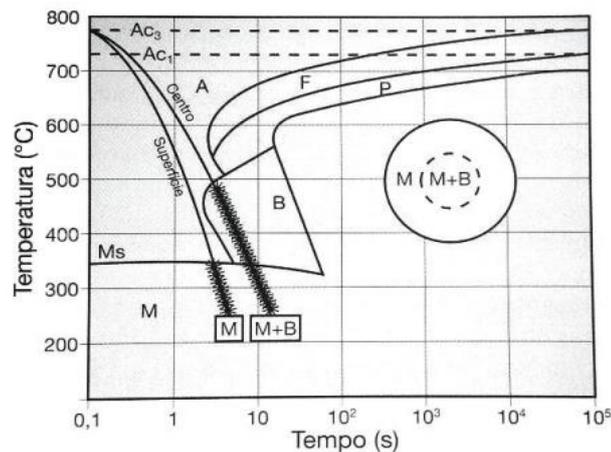
Têmpera: A operação de têmpera visa a obtenção do constituinte martensita, o processo de têmpera consiste em um resfriamento rápido e controlado do material, que anteriormente foi aquecido (temperaturas de 750°C até 1250°C) visando a austenitização total, para que os carbonetos dos elementos de liga se dissolvam, em seguida, resfria-se a peça tratada em meio refrigerante adequado para a transformação martensítica (BORTOLETO, 2010; SOUSA 2007); Este tratamento térmico é de grande importância, porque é por intermédio dele, acompanhado

pelo revenido, que se obtém as estruturas e as propriedades que permitem o emprego do aço em peças que necessitam de maior dureza (CHIAVERINI, 2008); Para obtenção da martensita é necessário que o aço atinja temperaturas de austenitização. Para que isto ocorra, a ferrita (estrutura CCC) é aquecida de tal forma que ocorre uma transformação polimórfica para a austenita, estrutura cristalina CFC; As temperaturas empregadas na têmpera variam de acordo com o teor de carbono, portanto, escolhem-se temperaturas de 40°C à 60°C acima da temperatura crítica, para efetuar o tratamento de têmpera (ALBANO, 2012; BARREIRO, 1985). É necessário um tempo de aquecimento para que se ocorra total homogeneização, transformando a estrutura polimórfica de ferro α para ferro γ ; Após a realização do aquecimento e austenitização do aço, o mesmo é resfriado de forma rápida, para que a transformação de austenita em martensita ocorra.

O resfriamento deve ser de tal forma que se evite a transformação da austenita nos seus produtos de decomposição como ferrita ou cementita mais perlita, dando lugar a transformação da martensita. Dependendo da velocidade de resfriamento a que o material é submetido, obtém-se uma determinada proporção entre as diferentes fases do material, o que irá determinar posteriormente as características físicas e mecânicas para este material, sendo elas: dureza, tenacidade, ductibilidade, entre outros (BORTOLETO 2010). A temperabilidade do material da peça é a característica que define a variação de dureza desde a superfície até o núcleo da peça quando temperada. Está associada à capacidade de determinado aço formar martensita e, portanto, à velocidade crítica de têmpera. O tamanho de grão e a homogeneidade da microestrutura inicial (austenítica) têm efeito sobre a temperabilidade do aço, enquanto o carbono tem um forte efeito sobre a dureza da martensita (ALBANO, 2012; BARREIRO, 1985).

Para exemplificar a temperabilidade de um aço e a sua relação com os microconstituintes formados ao longo da peça, a Figura 2 ilustra um cilindro que está sendo resfriado. Na superfície, onde a troca de calor é maior e conseqüentemente o tempo para atingir a temperatura M_s é menor, obtém-se somente martensita, já no centro, onde o resfriamento ocorre de forma mais lenta, há formação de porcentagens de martensita e bainita, que por consequência fornece características distintas na superfície e no centro da peça. Na superfície há alta dureza devido a formação somente de martensita, no centro há combinação de dureza e ductibilidade, pois a bainita é mais dúctil comparada a martensita, pode-se até desprezar a ductibilidade da martensita (COLPAERT, 2008).

Figura 2 – Curvas de resfriamento ao longo de um aço genérico de formato cilíndrico

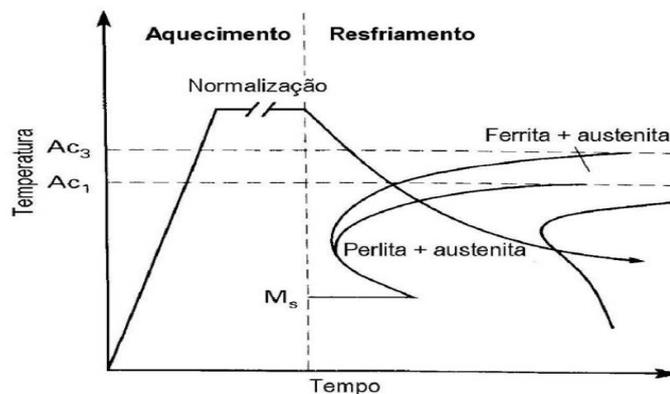


Fonte: Colpaert, (2008).

Diferentes condições de resfriamento geram diferentes microestruturas formadas ao longo da peça, dependendo das dimensões da peça, do meio de resfriamento e da temperabilidade do aço. Os elementos de liga também influenciam na profundidade de penetração da têmpera.

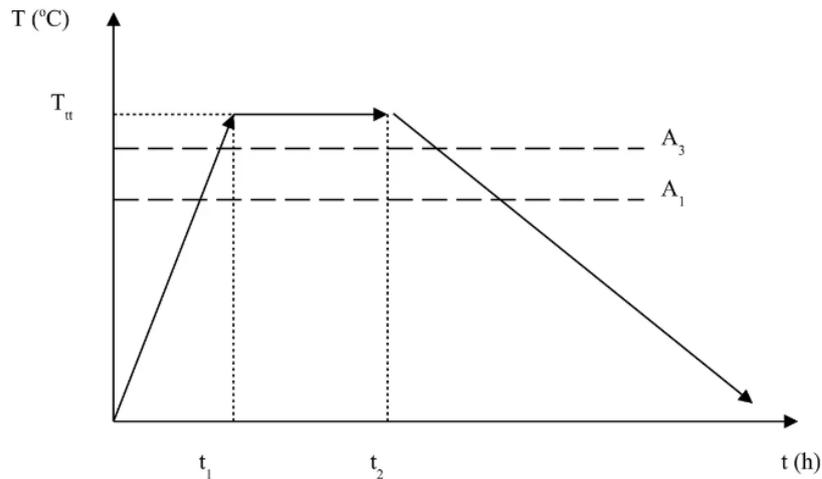
Normalização: é um processo térmico que tem a finalidade de alterar as propriedades físicas do metal, a fim de melhorar a capacidade de usinagem e aumentar a resistência mecânica; O procedimento tem como função principal homogeneizar e refinar a granulação da microestrutura do aço. Destaca-se que o procedimento de normalização de aços proporciona aspectos mecânicos de resistência superiores aos obtidos pelo método de recozimento; O processo de normalização de aços é desenvolvido através de ciclos de aquecimento e resfriamento controlados. O controle das curvas de tempo e temperatura, assegura que esse processo alcance os resultados esperados; primeiramente, a peça é aquecida acima da linha de austenitização, por tempo suficiente para uniformizar a temperatura da superfície e do núcleo. Então, ocorre um resfriamento a uma taxa média, em geral ao ar calmo ou forçado. Nesse resfriamento, os grãos voltam a se transformar em geral na forma de perlita e ferrita com a granulação mais refinada. Esse processo proporciona mais facilidade de usinagem para as peças nas características de resistência mecânica de peças conformadas, conforme mostrado na Figura 3 (COLPAERT, 2008).

Figura 3 – Curvas de temperatura x tempo tratamento de normalização



Fonte: Callister, (2015)

Recozimento: O recozimento do aço é um método que consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica, durante um certo período de tempo necessário, seguido de processos de resfriamento lento ou mediante o controle da velocidade de resfriamento do forno, tendo como objetivo aprimorar as propriedades do aço a fim de atender aos requisitos de usinabilidade; Esse recozimento do aço é um processo muito eficiente, que apresenta como vantagens a suavização do aço; melhora na usinabilidade do material; aumento a ductilidade e da dureza do aço; melhora a homogeneidade; a granulação e refinamento; preparação para tratamento térmico adicional, etc. Entre outros objetivos que do recozimento do aço, estão os seguintes: Remover tensões devidas ao tratamento mecânico a frio ou a quente; Modificar as propriedades mecânicas como ductilidade, resistência, entre outros; Alterar as características elétricas e magnéticas e adequar o tamanho do grão; Regularizar a textura bruta, produzir uma microestrutura definida, remover gases e eliminar qualquer efeito de tratamentos térmicos ou mecânicos que o aço tiver sido anteriormente submetido, na Figura 4 observa-se o efeito da temperatura e o tempo de resfriamento necessário para que ocorra o recozimento do aço (CHIAVERINI, 2008).

Figura 4 – Curvas de temperatura x tempo tratamento de recozimento

Fonte: Chiaverin, 2015

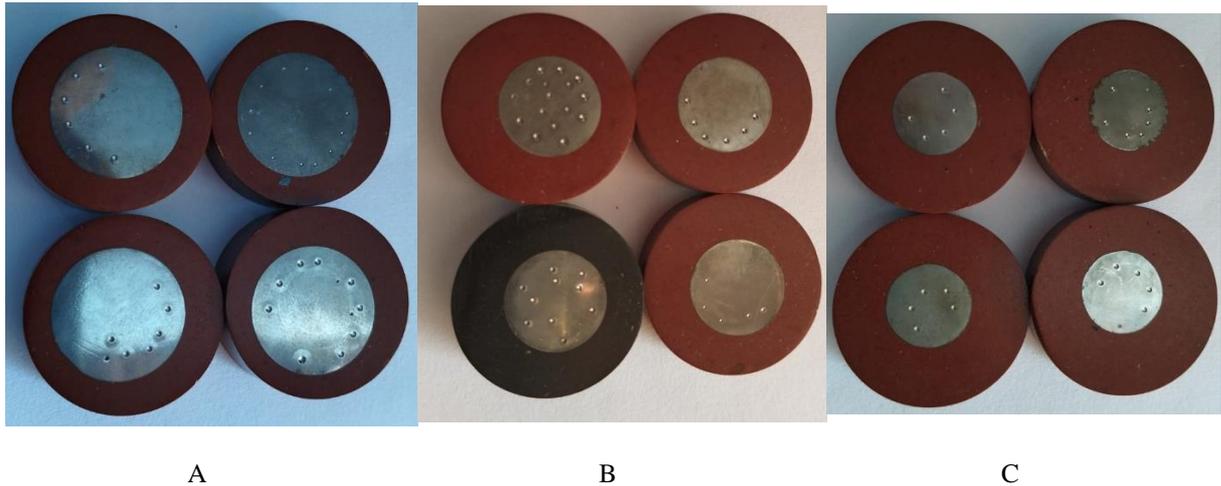
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A preparação das amostras, análises de dureza e análise microscópica foram realizadas no Centro Tecnológico da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG), Goianésia GO. A fim de se obter o perfil de dureza das amostras após realização da têmpera, normalização e recozimento os gráficos gerados da medição de dureza, foram divididos em gráficos de comum interesse, para análise e comparação para cada tipo de aço. Analogamente para a microestrutura formada, será também comparada para cada tipo de aço e tratamento térmico. Para alcançar maior precisão nos dados coletados, foi utilizado o cálculo de desvio padrão para o ensaio de dureza, dado pela Equação 1:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

Em que x é o valor de cada medição, \bar{x} o valor da média de amostra e n é o tamanho amostral.

O propósito deste estudo foi investigar os parâmetros de dureza resultantes dos tratamentos térmicos de têmpera, recozimento e normalização. Para a realização desses experimentos, foram selecionados os aços SAE 1020, SAE 1045 e ASTM A36, os quais se apresentam comumente na forma de barras redondas e são conhecidos por sua capacidade de serem temperados durante processos térmicos. Inicialmente, procedeu-se ao corte das barras redondas em quatro partes iguais, cada uma com 5 mm de espessura, mantendo as dimensões específicas de 20 mm de diâmetro para o SAE 1020, 16 mm para o SAE 1045 e 10 mm para o ASTM A36, conforme ilustrado na Figura 5. Este procedimento padronizado visou assegurar uma abordagem uniforme em todas as amostras, proporcionando consistência nos resultados obtidos.

Figura 5 – Amostras de aços SAE 1020 (A), SAE 1045 (B), ASTM A36 (C)

Fonte: Próprio Autor, (2023)

Nesta fase, procedeu-se à preparação meticulosa de cada amostra, empregando o método de embutimento por meio da avançada embutidora EFD30, com a adição de baquelite, seguida de etapas de desbaste e polimento utilizando a lixadeira e politriz PLFDV. Tanto o embutimento quanto o desbaste foram executados antes do início dos processos de tratamentos térmicos, visando assegurar uma superfície isenta de defeitos nas amostras.

Para atingir esse objetivo, foram aplicadas lixas de diferentes granulações (40, 80, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh), utilizando ambas as ferramentas mencionadas, conforme ilustrado na Figura 6. Essa abordagem metodológica visa garantir a uniformidade e a qualidade da superfície das amostras, proporcionando condições ideais para a execução dos tratamentos térmicos subsequentes. A utilização desses equipamentos especializados e a sequência de procedimentos adotada reforçam a robustez da metodologia aplicada, contribuindo para a confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos durante o experimento.

Figura 6 – Embutidora EFD30 (A) e Lixadeira e politriz PLFDV (B)

Fonte: Próprio Autor, (2023)

O aquecimento controlado do aço foi conduzido em um forno do tipo Mufla, conforme ilustrado na Figura 7. Cada amostra foi submetida a um processo de aquecimento em uma faixa de temperatura específica, determinada pelo tipo de aço e pelo tratamento térmico aplicado. Tanto a têmpera quanto o recozimento foram realizados a uma temperatura de 850°C, sendo que, durante o processo de têmpera, as amostras foram resfriadas em uma solução de salmoura contendo 10% de sal NaCl. A normalização ocorreu a 900°C, seguida por resfriamento ao ar livre, enquanto o recozimento foi seguido de resfriamento no próprio forno.

Com o intuito de garantir a precisão e minimizar possíveis desvios experimentais, cada amostra foi cuidadosamente acondicionada. Esta precaução visa manter a integridade dos dados coletados, permitindo que os resultados experimentais possam ser reproduzidos em situações futuras, assegurando, assim, a confiabilidade dos dados obtidos durante o experimento. Essa abordagem metodológica robusta reforça a consistência e a validade dos resultados, contribuindo para a credibilidade e relevância do estudo no âmbito científico.

Figura 7 – Forno tipo Mufla QUIMIS



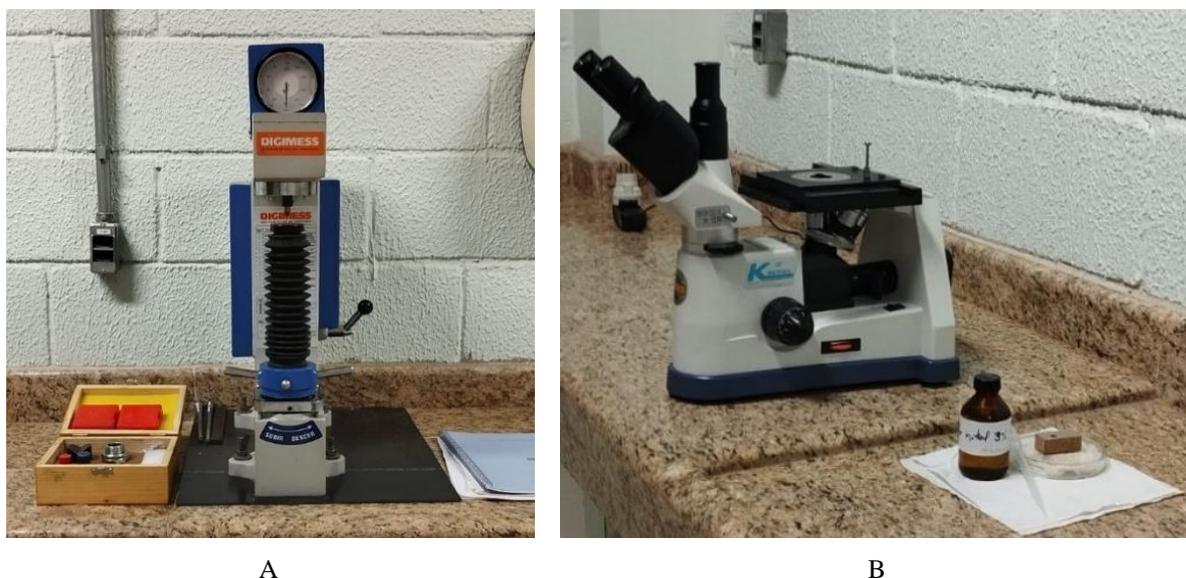
Fonte: Próprio Autor, (2023)

Após a implementação dos tratamentos térmicos nos aços, o processo subsequente envolveu o embutimento das amostras submetidas a esses procedimentos. Em seguida, procedeu-se ao desbaste, utilizando lixas de (600 e 1200 mesh), seguido pelo polimento com alumina 1%. A avaliação do perfil de dureza foi conduzida por meio do Durômetro Mecânico de Bancada da marca DIGIMESS, equipado com indutores de ponta de diamante e ponta esférica 1/16, submetendo as amostras a cargas de 150 kgf e 100 kgf, respectivamente. Este equipamento encontra-se disponível no laboratório de ensaios mecânicos da Faculdade Evangélica de Goianésia, conforme ilustrado na Figura 8A.

Como parâmetro de medida, foram adotadas as escalas de dureza Rockwell B (HRB) e Rockwell C (HRC). Antes das medições de dureza, foram realizados testes microscópicos nas amostras, abrangendo tanto as amostras padrão quanto aquelas submetidas ao tratamento térmico. Para tais testes, utilizou-se uma solução de Nital 3%, com um tempo de ataque de 10 segundos. As análises microscópicas das estruturas foram conduzidas com ampliações de 40x e 100x, utilizando o microscópio óptico Kontrol IM100i para visualização, conforme retratado na Figura 8B. A integração dessas técnicas proporciona uma compreensão abrangente das

alterações estruturais nos materiais, contribuindo significativamente para a interpretação dos resultados obtidos durante o processo de tratamento térmico.

Figura 8 – Durômetro DIGIMESS (A) e Microscópio (B).



Fonte: Próprio Autor, (2023)

Após a análise de micrografia das estruturas, foi realizado as medidas de dureza respeitando as distâncias mínimas de 3 mm entre ponto de testes, foram realizadas 5 medições de dureza por amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio de dureza em um corpo de prova padrão, com dureza de 62,1 HRC, 82 HRB e após 5 medições, calculado o desvio padrão (1) dessa amostragem, adicionando a plotagem dos gráficos para melhor interpretação e precisão dos dados do perfil de dureza. Como parâmetro inicial, foi realizado o ensaio de dureza em peças compostas das mesmas características físico químico das peças tratadas termicamente as quais denominamos de amostras padrão (amostras reservadas para comparação de dureza entre os tratamentos térmicos), mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dureza das Amostras Padrão por tipo de aço

	DUREZA NAS AMOSTRAS PADRÃO (CONTROLE)					
	SAE 1020		SAE 1045		ASTM A36	
	Amostra Padrão		Amostra Padrão		Amostra Padrão	
(Testes) + Desvio Padrão	HRB	Vickers HV	HRC	Vickers HV	HRB	Vickers HV
(1) + desv. Padrão	92,5	206	22,3	251	86,1	176
(2) + desv. Padrão	93	209	23	254	90,1	194
(3) + desv. Padrão	89	189	24,1	262	89,2	190
(4) + desv. Padrão	92,5	206	25,9	273	86,3	177
(5) + desv. Padrão	92	204	27,5	284	88,2	186
Média	91,8	202,8	24,1	262	87,98	184,6

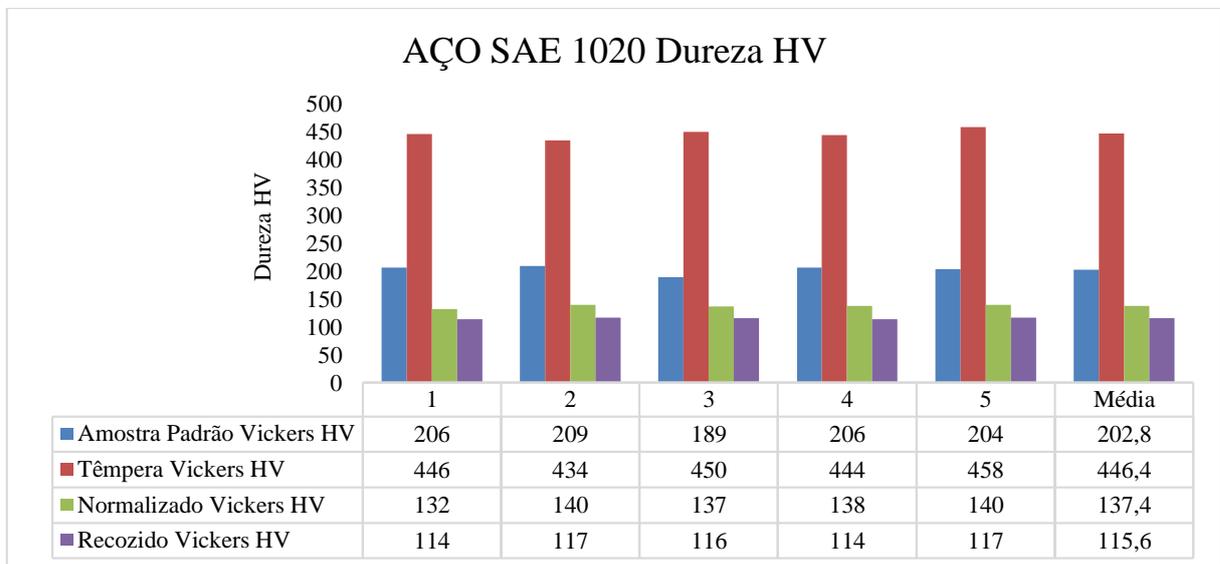
Fonte: Próprio Autor, (2023)

Com base nos parâmetros iniciais estabelecidos, procedeu-se à realização dos ensaios de dureza nas demais peças que foram submetidas a tratamentos térmicos. As medições foram conduzidas nas escalas Rockwell C e Rockwell B, e, considerando a complementaridade dessas escalas para fins de comparação, efetuou-se a conversão de todas as medições para a escala Vickers HV.

Ao analisar o Gráfico 1, referente aos testes realizados nas amostras de aço SAE 1020, torna-se evidente que os tratamentos térmicos promoveram alterações notáveis no perfil de dureza. A amostra submetida ao processo de têmpera apresentou um incremento significativo de aproximadamente +220% em sua dureza. Em contrapartida, a amostra sujeita ao processo de normalização registrou uma redução expressiva de aproximadamente -32% em sua dureza. No contexto do recozimento, a amostra apresentou uma diminuição de -43% em sua dureza, quando comparada à amostra padrão. Vale ressaltar a detecção de martensita na amostra submetida à têmpera, evidenciada pela formação de agulhas cruzadas em sua microestrutura, conforme ilustrado na Figura 9B.

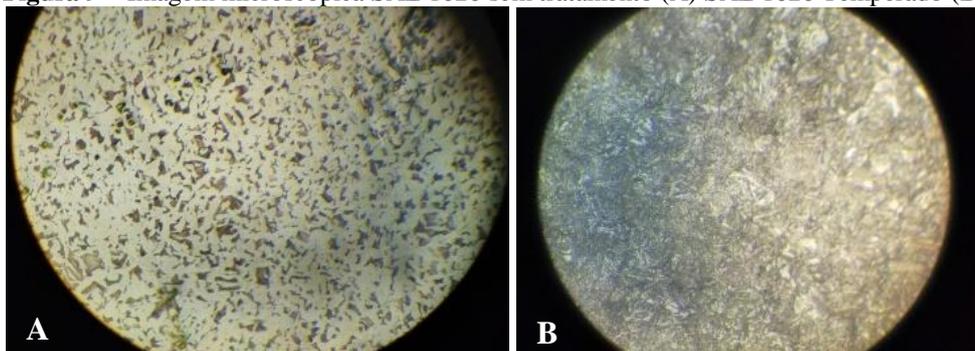
Essas análises não apenas corroboram os resultados quantitativos da dureza, mas também enriquecem a compreensão sobre os efeitos dos diferentes tratamentos térmicos nas propriedades microestruturais e mecânicas do aço SAE 1020, consolidando, assim, uma fundamentação científica consistente para as conclusões obtidas.

Gráfico 1 – SAE 1020 Comparação de dureza entre amostra padrão e amostras tratadas termicamente



Fonte: Próprio Autor, (2023)

Figura 9 – Imagem microscópica SAE 1020 sem tratamento (A) SAE 1020 Temperado (B)

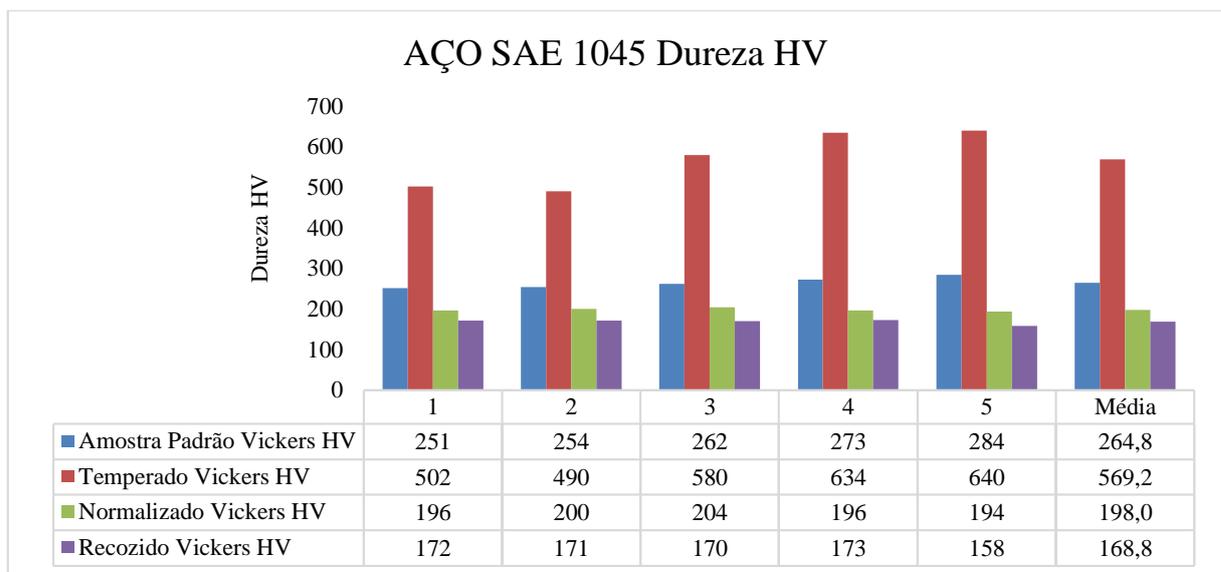


Fonte: Próprio Autor, (2023)

Conforme evidenciado no Gráfico 2, em relação ao aço SAE 1045, é possível notar variações significativas na dureza do material quando submetido a diferentes processos. Para as amostras que passaram pelo processo de têmpera, registrou-se um notável aumento de +221% em sua dureza. Em contrapartida, as amostras submetidas ao processo de normalização apresentaram uma redução de -25% em sua dureza. Já as amostras tratadas com recozimento demonstraram uma diminuição de -36% em sua dureza, sempre em comparação com a amostra padrão de referência.

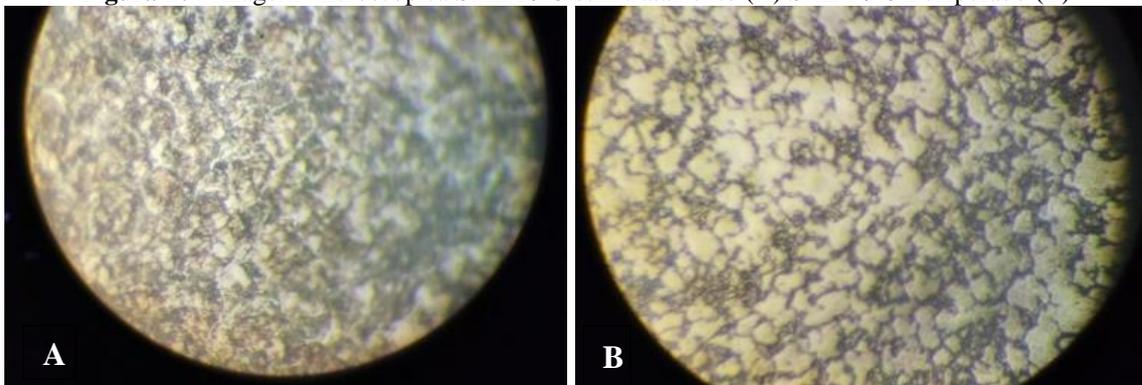
Adicionalmente, ao analisar as micrografias das amostras temperadas e resfriadas em salmoura, foi possível identificar a presença de martensita, resultado característico do processo de têmpera com resfriamento brusco, como ilustrado na Figura 10B. Essas observações corroboram as análises quantitativas da dureza, consolidando assim uma compreensão abrangente dos efeitos dos diferentes tratamentos térmicos sobre as propriedades microestruturais e mecânicas do aço SAE 1045.

Gráfico 2 – SAE 1045 Comparação de dureza entre amostra padrão e amostras tratadas termicamente



Fonte: Próprio Autor, (2023)

Figura 10– Imagem microscópica SAE 1045 sem tratamento (A) SAE 1045 Temperado (B)

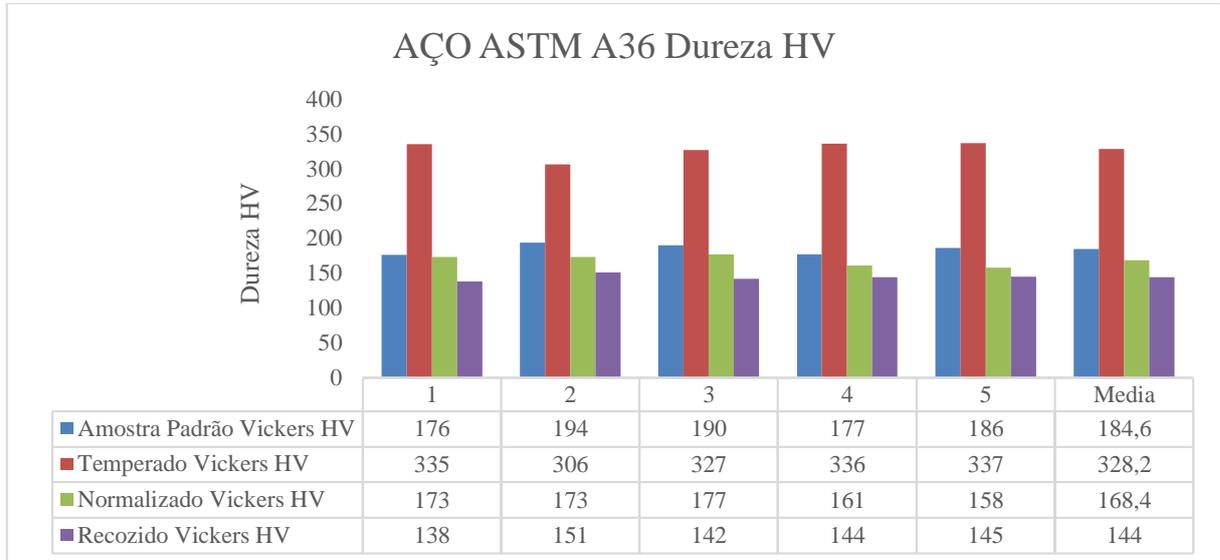


Fonte: Próprio Autor, (2023)

Apartir da análise do Gráfico 3, é possível inferir que o aço ASTM A36 exibiu variações notáveis de dureza nas amostras submetidas a tratamento térmico em comparação com a amostra padrão. Para o processo de têmpera, observou-se um aumento expressivo de +178% na dureza. Em contrapartida, o tratamento de normalização resultou em uma redução de -9% na dureza, enquanto o recozimento promoveu uma diminuição de -22% em comparação

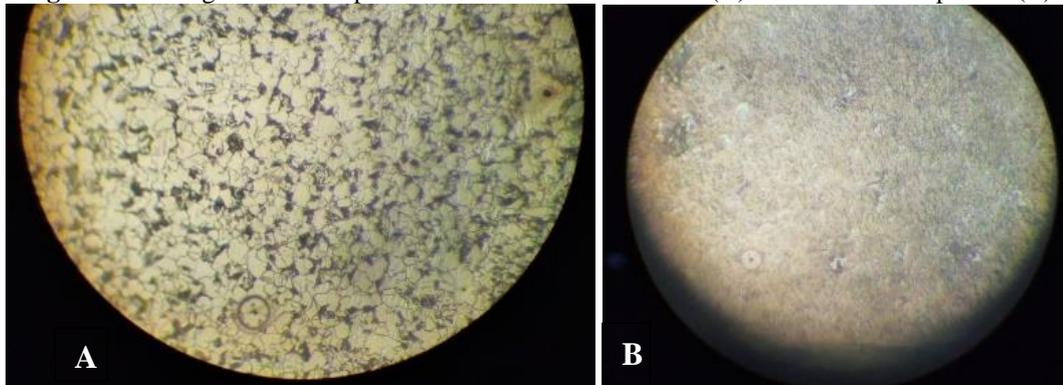
com a amostra de referência. Cabe destacar que, durante a análise microscópica, a presença de martensita foi verificada na estrutura cristalina do aço ASTM A36, conforme evidenciado na Figura 11B.

Gráfico 3 – ASTM A36 Comparação de dureza entre amostra padrão e amostras tratadas termicamente



Fonte: Próprio Autor, (2023)

Figura 11 – Imagem microscópica ASTM A36 sem tratamento (A) ASTM A36 Temperado (B)



Fonte: Próprio Autor, (2023)

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas e nos resultados obtidos, conclui-se que o processo de têmpera aplicado nos aços SAE 1020, SAE 1045 e ASTM A36 demonstrou efetividade ao promover um aumento uniforme da dureza ao longo do perfil das amostras. Em contraste, os tratamentos de normalização e recozimento evidenciaram a esperada redução na dureza dos materiais. Os resultados obtidos nos diversos tratamentos térmicos corroboram a eficácia desses processos para adequar os aços conforme as aplicações e necessidades específicas.

Reforça-se a necessidade de um rigoroso controle da geometria das amostras, assim como da manutenção precisa dos parâmetros de temperatura durante os processos de tratamento termico. Esses fatores são fundamentais para assegurar a confiabilidade e a consistência dos resultados, consolidando, assim, a validade das conclusões obtidas no estudo.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 136** – Tratamentos Térmicos de Aço – Terminologias e Definições. 1997;
- ALTAWELL, Ali; TOLOUEI-RAD, Majid. **Effect of Quenching media, specimen size and shape on the hardenability of AISI 4140 steel**. Artigo apresentado para jornal de Engenharia em Emirados Árabes. Cowan University. Austrália, 2014;
- ALBANO, Luigi. L. M. **Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas de Aço AISI 5160 submetidos à Têmpera Convencional e Têmpera intensiva**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, 2012;
- ASM, Metals Handbook. **Introduction of Heat Treating of Tool Steels**, vol 4, 1991;
- ASM, Metals Handbook. **Metallography and Microstructures**, vol 9, 1991;
- BARREIRO, J. A. **Tratamientos Térmicos de Los Aceros**. 8 ed. Madri. Espanha: Editorial Dossat, 1985;
- BERRAHMOUNE, M. R. **Transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austénitique instable 301LN**. Tese de Doutorado – Doctorat Mécanique et Matériaux, ENSAM, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006;
- BORTOLETO, Eleir. M. **Modelamento Numérico Computacional das Transformações de fase nos Tratamentos Térmicos de Aços**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010;
- CALLISTER, Willian. D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012;
- CALLISTER, Willian. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015;
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos comuns**. 4. ed. Revista e atualizada. São Paulo: Editora Blucher, 2008;
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros fundidos**, 7. ed. Revista e atualizada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008;
- CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008;
- DE SOUSA. Ester. C. **Estudo da Oxidação do Óleo de Soja com diferentes concentrações de Aditivos Antioxidantes, para uso em Tratamentos Térmicos de Têmpera**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007;

ECHEVERRI, Edwan. A; TSCHIPTSCHIN, André. P. **Análise numérica e experimental das tensões residuais geradas na têmpera de um cilindro de aço AISI 4140**. Artigo apresentado em congresso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2012; FUNATANI, Kiyoshi. Heat treatment of automotive components: Current status and future trends. Artigo. Transactions of The Indian Institute of Metals. Nagoya, 2004;

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados de Mercado**, 2022. Disponível em: Acesso em: 20 de abr. 2022;

MACEDO, Marciano Q. **Efeito dos Parâmetros de Austenitização sobre a Microestrutura e as Propriedades do Aço SAE 4140 submetido a Tratamentos Térmicos por Indução Eletromagnética**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática, 2007;

RASMA, Eline. Tourinho. **Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 Tratado Sob Diferentes Tratamentos Térmicos**. 2015, 128 pág. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2015;

SEVALE, Lucas. G. **Estudo da Influência de Tratamentos Térmicos nas variações Microestruturais do Aço SAE 4340**. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília. Brasília, 2014;

TSCHIPTSCHIN, André. P. **TRATAMENTOS TÉRMICO DE AÇOS**. Disponível em: Acesso em: 21 de set. 2016; 36 Valor Econômico, Dados da Produção industrial no Brasil em 2016. Disponível em: Acesso em: 29 de jul. 2017;

ZUPPO, Ricardo M. **Análise Comparativa do Efeito de Têmpera e Revenimento e da Austêmpera seguida ou não de conformação a frio na Microestrutura e nas Propriedades do Aço SAE 4140H**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.