



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ- IFPI
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AGNALDO CARDOSO DA PENHA ROSA

**ESTUDO COMPARATIVO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DO AÇO
1045 UTILIZANDO OS TRATAMENTOS TÉRMICOS**

TERESINA

2025

AGNALDO CARDOSO DA PENHA ROSA

ESTUDO COMPARATIVO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DO AÇO
1045 UTILIZANDO OS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção do
diploma do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí,
Campus Teresina Central.

Orientador: Dr. José Weliton Nogueira Júnior

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Rosa, Agnaldo Cardoso da Penha

R788e Estudo comparativo da microestrutura e microdureza do aço 1045 utilizando os tratamentos térmicos / Agnaldo Cardoso da Penha Rosa. - 2025.
35 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. José Weliton Nogueira Júnior.

1. Tratamento térmico. 2. Microestrutura. 3. Microdureza. I. Título.

CDD - 620

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

AGNALDO CARDOSO DA PENHA ROSA

ESTUDO COMPARATIVO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DO AÇO
1045 UTILIZANDO OS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção do
diploma do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí-
Campus Teresina Central.

Aprovado em: 13/06/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Weliton Nogueira Júnior (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra,
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. M.sc. Renan Matos Monção, FACID

AGRADECIMENTOS

A Deus, o grande arquiteto do universo, que todos os dias faz brilhar a luz em meus olhos, dá-me forças e me ampara diante das minhas imperfeições.

Ao meu filho Davi, que me mostrou uma força que eu não imaginava existir em mim e por meio de quem descobri o amor verdadeiro.

À minha mãe, Maria Francisca Cardoso, e ao meu pai, José da Penha Rosa, pelo apoio, amparo, proteção e amor, sobretudo pelo exemplo de dignidade e honestidade em minha formação.

Aos meus irmãos, Valdinar e Edimar, pelos belos momentos que compartilhamos. Que continuemos assim, sempre unidos.

À minha companheira, Leilane, por sua paciência, amor e apoio durante toda a elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador, José Weliton Nogueira Junior, pela paciência que teve comigo.

Ao professor Petteson Linniker Carvalho Serra, pela contribuição para que eu chegasse até aqui.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram para o meu êxito educacional, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

O aço é uma liga metálica amplamente utilizada na indústria devido à sua versatilidade, resistência mecânica e capacidade de ser tratado termicamente para atender a diferentes aplicações. O aço SAE 1045, em particular, é um aço médio-carbono com boa resistência mecânica e moderada usinabilidade, sendo comumente empregado na fabricação de eixos, engrenagens e componentes estruturais. Este trabalho teve como objetivo analisar as alterações microestruturais e a variação da microdureza do aço SAE 1045 submetido a diferentes tratamentos térmicos. Foram preparadas cinco amostras, sendo uma sem tratamento térmico, para caracterização, e quatro submetidas a recozimento, normalização, têmpera e revenimento. O tratamento térmico foi realizado em um forno JUNG, modelo LT 83013. As amostras passaram por lixamento manual, polimento com alumina e ataque químico com Nital 5% para observação no microscópio óptico OLYMPUS, modelo CX31. A microdureza foi avaliada por meio do microdurômetro SHIMADZU, modelo HMV, com uma carga de 4,903 N e tempo de aplicação de 15 segundos. Os resultados mostraram que o recozimento reduziu significativamente a dureza do material, enquanto a têmpera promoveu um aumento expressivo da microdureza devido à formação de martensita. O revenimento reduziu parcialmente a dureza, equilibrando resistência e ductilidade. Os valores obtidos estão em conformidade com a literatura, evidenciando a influência dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas do aço SAE 1045.

Palavras-chave: tratamento térmico; microestrutura; microdureza.

ABSTRACT

Steel is a widely used metallic alloy in the industry due to its versatility, mechanical strength, and ability to undergo heat treatment to meet different applications. SAE 1045 steel, in particular, is a medium-carbon steel with good mechanical strength and moderate machinability, commonly used in the manufacturing of shafts, gears, and structural components. This study aimed to analyze the microstructural changes and microhardness variations of SAE 1045 steel subjected to different heat treatments. Five samples were prepared, one without heat treatment for characterization and four subjected to annealing, normalizing, quenching, and tempering. The heat treatment was performed in a JUNG furnace, model LT 83013. The samples underwent manual grinding, polishing with alumina, and chemical etching with 5% Nital for observation under an OLYMPUS optical microscope, model CX31. Microhardness was measured using a SHIMADZU microhardness tester, model HMV, with a load of 4.903 N and an application time of 15 seconds. The results showed that annealing significantly reduced the material's hardness, while quenching led to a significant increase in microhardness due to martensite formation. Tempering partially reduced hardness, balancing strength and ductility. The obtained values are consistent with the literature, highlighting the influence of heat treatments on the mechanical properties of SAE 1045 steel.

Keywords: heat treatment; microstructure; microhardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de temperatura para os tratamentos térmicos	23
Figura 2 - Aço SAE 1045 sem tratamento	26
Figura 3 - Amostras aço SAE 1045 submetidas ao recozimento.....	27
Figura 4 - Amostras submetidas a normalização.....	28
Figura 5 - Amostras após a têmpera	28
Figura 6 - Perfil de microdureza da têmpera no aço SAE 1045	29
Figura 7 - Amostra após a têmpera e o revenimento	30
Figura 8 - Gráfico da Microdureza do aço SAE 1045	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de tratamento térmico para o aço SAE 1045.....	22
Tabela 2 - Características dos tratamentos térmicos aplicados no aço SAE 1045	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Geral	11
1.2.2	Específicos	11
1.3	JUSTIFICATIVA	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	AÇO CARBONO	13
2.2	TIPOS DE AÇO	15
3	AÇO SAE 1045	17
3.1	PROPRIEDADES	17
3.2	APLICAÇÕES	17
4	TRATAMENTOS TÉRMICOS	19
4.1	TIPOS DE TRATAMENTOS, DIFERENÇAS E APLICAÇÕES	20
4	METODOLOGIA	24
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	24
4.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
	REFERENCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A descoberta dos metais pela humanidade há milhares de anos marcou um divisor de águas no desenvolvimento das sociedades (Leslie 1982). Inicialmente, os metais eram utilizados em seu estado bruto, mas, com o tempo, descobriu-se que o aquecimento e o resfriamento controlados desses materiais poderiam alterar suas propriedades, tornando-os mais duros, resistentes ou maleáveis, conforme a necessidade. Essa observação empírica deu origem aos primeiros passos do que hoje conhecemos como tratamentos térmicos (Strohaecker; Frainer, 2003).

Os tratamentos térmicos são práticas amplamente utilizadas na metalurgia para modificar as propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais, possibilitando sua adequação a diferentes aplicações industriais (Oliveira, 2007). O desenvolvimento dessas técnicas remonta à antiguidade, quando ferramentas de metal eram aquecidas e resfriadas de maneira empírica (Strohaecker; Frainer, 2003). Com a evolução tecnológica e científica, os tratamentos térmicos passaram a ser realizados com maior controle, visando otimizar características como dureza, tenacidade e ductilidade (Caruso, 2004).

Na Idade Média, a fabricação do aço era realizada por meio do aquecimento do ferro em contato com materiais ricos em carbono, processo que enriquecia a superfície do metal. Para obter materiais duros e com maior volume, pequenas peças enriquecidas em carbono eram forjadas em conjunto. Contudo, foi necessário o avanço de muitas gerações para que o homem desenvolvesse métodos mais eficazes de aquecimento e resfriamento, aprimorando os tratamentos térmicos e alcançando níveis mais elevados de qualidade e uniformidade nos metais (Oliveira; Denti, 2007).

Dentro desse contexto, os aços carbono emergem como uma das classes mais relevantes de ligas metálicas, devido à sua versatilidade e capacidade de responder aos diferentes tratamentos térmicos (McClements; Conniff, 2022). Essas ligas, compostas basicamente por ferro e carbono, possuem propriedades mecânicas diretamente influenciadas pelo teor de carbono presente, o que define sua classificação em baixo carbono (até 0,30%), médio carbono (0,30% a 0,60%) e alto carbono (acima de 0,60%) (Islan; Rashed, 2019).

O aço SAE 1045, por exemplo, destaca-se como uma das ligas de médio carbono mais utilizadas na indústria, especialmente nos setores automotivo, de máquinas e ferramentas. Essa popularidade se deve ao seu equilíbrio entre

resistência e maleabilidade, características que o tornam ideal para processos de transformação e aprimoramento por meio de tratamentos térmicos como recozimento, normalização, têmpera e revenimento (Oliveira; Denti, 2007).

Diante desse cenário o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo da microestrutura e microdureza do aço 1045 utilizando os tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera e revenimento. A análise pretende contribuir para o melhor entendimento dos efeitos de cada tratamento e suas aplicações práticas na engenharia dos materiais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

- Realizar um estudo comparativo da microestrutura e microdureza do aço SAE 1045 submetido aos tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera e revenimento, avaliando o impacto de cada processo nas propriedades mecânicas do material.

1.2.2 Específicos

- Analisar as alterações microestruturais do aço SAE 1045 após cada tipo de tratamento térmico, utilizando técnicas de microscopia óptica.
- Avaliar a variação da microdureza e da dureza macroscópica do material em função dos diferentes tratamentos térmicos aplicados.
- Identificar as condições ideais de tratamento térmico para o aço SAE 1045, visando o equilíbrio entre resistência mecânica e ductilidade para aplicações específicas.

1.3 JUSTIFICATIVA

O aço SAE 1045 é amplamente utilizado em indústrias automotiva, mecânica e de ferramentas devido à sua versatilidade, resistência mecânica e facilidade de usinagem (Martins, 2024). No entanto, o desempenho desse material em aplicações específicas está diretamente relacionado às suas propriedades microestruturais, que podem ser modificadas por meio de tratamentos térmicos (Nunes, 2019).

Apesar de sua relevância, há lacunas no entendimento prático e comparativo sobre como cada tratamento térmico impacta as características do aço SAE 1045, especialmente no que diz respeito à microestrutura e à microdureza. Essa análise é essencial para orientar a escolha do tratamento térmico mais adequado às necessidades específicas de cada aplicação, promovendo a melhoria de processos industriais e a redução de custos.

Sobretudo, o avanço no conhecimento sobre o comportamento do aço SAE 1045 frente a diferentes tratamentos térmicos contribui para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes no setor de engenharia de materiais. Essa pesquisa, portanto, não só oferece benefícios diretos para a indústria, como também amplia a base científica sobre a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas em aços de médio carbono.

Dessa forma, a realização deste estudo é justificada pela sua relevância tanto acadêmica quanto prática, fornecendo subsídios importantes para o aprimoramento de processos industriais e a utilização otimizada do aço SAE 1045 em diferentes contextos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AÇO CARBONO

O aço é uma liga metálica composta predominantemente por ferro e carbono, com um teor de carbono que varia de 0,02% a 2,14% (Novotny, 2001). Sua criação surgiu como uma solução para superar as limitações do ferro puro que tinha baixa resistência mecânica e uma tendência à oxidação rápida, tornando-o inadequado para aplicações industriais (Ishtiaq *et al.*, 2022).

A adição controlada de carbono e outros elementos como manganês, fósforo e silício permitiu a transformação do ferro em um material mais resistente, durável e versátil: o aço (Dwivedi; Lepková; Becker, 2017). Desde sua origem, o aço desempenhou um papel fundamental no avanço das civilizações, sendo adaptado e aprimorado ao longo dos séculos para atender às necessidades da construção civil, indústria e tecnologia (Okokpujie *et al.*, 2023).

Entre as diversas variedades de aço desenvolvidas, o aço carbono se destaca como um dos materiais mais amplamente utilizados. Essa liga metálica é composta essencialmente por ferro e carbono, com pequenas quantidades de outros elementos presentes como impurezas, incluindo fósforo, enxofre e silício. A proporção de carbono desempenha um papel fundamental em suas propriedades mecânicas, determinando características como resistência, dureza e ductilidade (Ishtiaq *et al.*, 2022).

O teor de carbono na composição pode variar entre 0,008% e 2,11%, classificando o aço carbono em três categorias principais: baixo, médio e alto carbono. Essa classificação permite que o material seja ajustado para diferentes aplicações, desde componentes estruturais leves até ferramentas de alta resistência (Islan; Rashed, 2019).

O baixo carbono (até 0,30%), apresenta alta tenacidade, ductilidade e facilidade de usinagem e soldagem. É amplamente usado em componentes estruturais leves e de baixa resistência. O médio carbono (0,30% a 0,60%), possui maior resistência e dureza, sendo ideal para aplicações que exigem temperabilidade e resistência ao desgaste, como eixos, engrenagens e componentes de máquinas. Já o alto carbono (acima de 0,60%), apresenta alta dureza e resistência ao desgaste, mas menor ductilidade. É utilizado em ferramentas de corte, molas e lâminas (Wondris *et al.*, 2024).

A classificação dos aços carbono é definida, principalmente, pelo percentual de carbono na liga, conforme normas técnicas internacionais, como as estabelecidas pela SAE (*Society of Automotive Engineers*). Essa classificação é fundamental para determinar a aplicabilidade de cada tipo de aço, além de orientar sua resposta a processos como tratamentos térmicos e usinagem (Nunes, 2020).

O aço carbono é especialmente valorizado por sua combinação de resistência mecânica, durabilidade e custo acessível. Suas propriedades podem ser ajustadas por meio de tratamentos térmicos, como têmpera e recozimento, permitindo modificações precisas para atender às demandas específicas de cada aplicação. Além disso, sua facilidade de soldagem e conformabilidade tornam-no amplamente utilizado em diversas indústrias (César Neto, 2015).

A construção civil, por exemplo, emprega o aço carbono em estruturas metálicas, corrimãos, telhados e elementos arquitetônicos (Dias, 1998). No setor automotivo, ele é essencial para a fabricação de peças de veículos leves e pesados. Já na indústria de máquinas, é utilizado em engrenagens, eixos e ferramentas de corte, enquanto na agricultura contribui para a produção de equipamentos e veículos (Karimi, 2023).

A história do aço carbono acompanha o desenvolvimento tecnológico e industrial da humanidade, consolidando-se como um material essencial devido à sua abundância na natureza, facilidade de fabricação e excelente custo-benefício. Embora o aço carbono seja menos resistente à corrosão quando comparado ao aço inoxidável, ele continua a ser amplamente utilizado em aplicações onde sua resistência mecânica e versatilidade superam a necessidade de resistência à oxidação (Instituto aço Brasil, 2022).

O impacto do aço carbono é evidente em sua onipresença em nossa vida cotidiana. Ele está presente em utensílios domésticos, eletrodomésticos como geladeiras e máquinas de lavar, equipamentos de ginástica e até mesmo em elementos de design arquitetônico e arte contemporânea. Sua contribuição para o avanço da indústria, arquitetura e infraestrutura é inquestionável, sendo um material indispensável para o desenvolvimento econômico e social (Nunes, 2020; César Neto, 2015).

2.2 TIPOS DE AÇO

Os aços podem ser classificados de acordo com seu teor de carbono e a presença de elementos de liga, apresentando características mecânicas específicas que influenciam suas aplicações. Os aços de alto carbono, com concentração de carbono entre 0,60% e 1,4%, destacam-se por sua elevada dureza e resistência mecânica, embora possuam menor ductilidade. Geralmente utilizados após processos de têmpera e revenimento, esses aços são altamente resistentes ao desgaste e à abrasão, o que os torna adequados para ferramentas de corte, matrizes de conformação, lâminas, molas e arames de alta resistência (Mecelis, 2017).

Os aços de médio carbono possuem uma composição de carbono que varia entre 0,25% e 0,60%. Essas ligas são frequentemente tratadas termicamente por meio de austenitização, têmpera e revenimento, o que resulta em propriedades mecânicas melhoradas, especialmente em estruturas martensíticas revenidas. Com isso, são amplamente utilizados em componentes que exigem alta resistência, como rodas, engrenagens e virabrequins (Nunes, 2020).

Já os aços de baixo carbono apresentam teor inferior a 0,25% e possuem microestruturas compostas principalmente por ferrita e perlita. Essa composição confere alta ductilidade e tenacidade, mas uma resistência mecânica relativamente baixa, com limites de escoamento típicos de 275 MPa e resistência à tração variando entre 415 MPa e 550 MPa. Esses aços são frequentemente utilizados em aplicações estruturais, como vigas, chapas para tubulações, carcaças de automóveis e pontes (Novotny, 2001).

Além disso, os aços podem ser diferenciados quanto ao teor de elementos de liga. Os aços microligados, por exemplo, combinam elementos como cobre, níquel, molibdênio, vanádio, titânio e nióbio em pequenas quantidades, promovendo resistência mecânica superior em comparação aos aços de baixo carbono convencionais. Entre esses, os aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) são conhecidos por sua alta performance estrutural (Vale, 2011).

Outro aspecto relevante é o nível de desoxidação durante a fabricação do aço, o que influencia suas propriedades. Os aços efervescentes têm desoxidação mínima, resultando em uma camada superficial de ferro quase puro, o que proporciona um acabamento livre de defeitos. Os aços acalmados, por sua vez, apresentam desoxidação completa, obtida pela adição de agentes como ferro-silício, resultando

em uma composição mais homogênea e melhor desempenho mecânico. Aços parcialmente acalmados e desoxidados a vácuo representam estágios intermediários e oferecem diferentes combinações de pureza e propriedades mecânicas (Islam; Rashed, 2019).

Por fim, os aços inoxidáveis, que pertencem à categoria de alta liga, são caracterizados pela resistência à corrosão devido ao elevado teor de cromo (acima de 10%) e, em alguns casos, pela presença de níquel (Vale, 2011). Esses materiais são amplamente empregados em ambientes que demandam alta durabilidade e resistência química, destacando-se entre os aços de alta liga ao lado dos aços-ferramentas, que possuem propriedades específicas para aplicações industriais. Dessa forma, a classificação e o entendimento das propriedades dos diferentes tipos de aço são essenciais para a escolha do material mais adequado às diversas demandas da indústria (Nunes, 2020).

3 AÇO SAE 1045

O aço SAE 1045 é uma liga metálica pertencente à família dos aços de médio carbono, caracterizada por um teor de carbono que varia entre 0,43% e 0,50%. Sua composição básica inclui Silício (0,15% - 0,35%), Manganês (0,30% - 0,60%), Fósforo (0,03% máx) e Enxofre (0,05% máx.) Essa combinação confere ao material características específicas que o tornam adequado para diversas aplicações industriais (Nunes, 2020).

3.1 PROPRIEDADES

Devido ao seu teor médio de carbono, o aço SAE 1045 apresenta boa resistência mecânica e moderada tenacidade, sendo utilizado em peças que exigem maior dureza e resistência ao desgaste. Embora sua conformabilidade seja inferior à dos aços de baixo carbono, ele ainda pode ser submetido a processos de usinagem, forjamento e tratamento térmico, como têmpera e revenido, para otimizar suas propriedades mecânicas. Sua soldabilidade, no entanto, é limitada, podendo exigir pré-aquecimento e pós-aquecimento para evitar trincas (Souza; Silva, 2018).

O limite de resistência à tração do aço SAE 1045 geralmente varia de 565 MPa a 660 MPa, enquanto o limite de escoamento situa-se em torno de 310 MPa a 340 MPa. Sua ductilidade é moderada, com alongamento em torno de 12% a 18%, menor que o dos aços de baixo carbono, mas ainda suficiente para aplicações estruturais e mecânicas. Além disso, sua condutividade térmica e elétrica segue padrões típicos de aços carbono-manganês de média resistência (Nunes, 2020).

3.2 APLICAÇÕES

Devido às suas boas propriedades mecânicas e resistência moderada, o aço SAE 1045 é amplamente utilizado em aplicações que exigem maior dureza e resistência ao desgaste, sendo adequado para peças submetidas a esforços mecânicos elevados. No entanto, sua conformabilidade é menor que a dos aços de baixo carbono, exigindo processos específicos de fabricação, como usinagem e forjamento. Alguns exemplos de aplicação incluem: Componentes mecânicos e automotivos, como eixos, engrenagens, pinos e virabrequins; Equipamentos

industriais, como buchas, mancais e peças estruturais sujeitas a impacto; Construção mecânica e estruturas metálicas: barras, suportes e elementos estruturais que demandam maior resistência etc. (Oliveira; Denti, 2007).

Além do mais, o aço SAE 1045 pode passar por tratamentos térmicos como têmpera e revenido, o que melhora suas propriedades mecânicas e aumenta sua dureza e resistência ao desgaste. Também pode receber tratamentos superficiais, como cementação ou nitretação, quando é necessário maior desempenho em ambientes de alta abrasão (Souza; Silva, 2018).

O aço SAE 1045 é um material versátil e amplamente utilizado em aplicações que demandam resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono, mantendo boa usinabilidade e possibilidade de tratamento térmico. Sua combinação de propriedades torna-o uma escolha popular em indústrias automobilística, metalúrgica e de máquinas e equipamentos, equilibrando custo-benefício e eficiência no processo produtivo (Santos, 2021).

4 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Tratamentos térmicos são processos metalúrgicos aplicados a materiais, especialmente ligas metálicas como o aço, com o objetivo de alterar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Esses processos envolvem o aquecimento e o resfriamento controlados do material, promovendo mudanças em sua microestrutura e, conseqüentemente, ajustando características como dureza, resistência, ductilidade e tenacidade, de acordo com as exigências de aplicação (Vale, 2011).

Os tratamentos térmicos possuem uma longa trajetória, que remonta aos primórdios da metalurgia, quando a humanidade começou a explorar os metais e suas aplicações práticas no cotidiano. Por volta de 1000 a.C., as primeiras civilizações descobriram que o aquecimento e o resfriamento de metais permitiam modificar suas propriedades mecânicas e metalúrgicas. Esse conhecimento possibilitou o desenvolvimento de materiais com características distintas, como maior dureza, maleabilidade etc. (Strohaecker; Frainer, 2003).

Cerca de 350 a.C., na Índia e na China, surgiu o ferro de fusão, obtido em fornos rudimentares que anteciparam o funcionamento dos altos-fornos modernos. O material resultante, um bloco esponjoso carregado de escórias, era martelado para purificação e posteriormente refundido em pequenos cadinhos, que se deixavam resfriar lentamente. Esse processo permitia a fabricação de ligas mais homogêneas e resistentes. Os aços de Damasco, por exemplo, destacaram-se como verdadeiros compósitos, formados por camadas alternadas de aço duro e aço macio, unidas por forjamento e soldagem, o que lhes conferia notável resistência e durabilidade (Wondris *et al.*, 2024).

Com o passar do tempo, o homem descobriu o aço, uma liga de ferro e carbono, e percebeu que variando o teor de carbono ou controlando a velocidade de resfriamento, era possível obter características diferenciadas, como elevada dureza ou maior ductilidade. Essa descoberta foi crucial para o desenvolvimento de ferramentas, armas e outros utensílios (Oliveira, 2007; Vale, 2011).

Durante a Idade Média, a fabricação de aço envolvia o aquecimento do ferro em contato com materiais ricos em carbono, enriquecendo sua superfície. Para obter materiais duros em maior volume, pequenas peças de aço enriquecido eram forjadas em conjunto. Contudo, o conhecimento sobre os processos de aquecimento e

resfriamento ainda era limitado, exigindo muitas gerações para aperfeiçoar as técnicas de tratamento térmico (Wondris *et al.*, 2024).

No século XVIII, em 1740, Benjamin Huntsman revolucionou a produção de aço ao redescobrir sua fusão em cadinhos, criando blocos homogêneos e de endurecimento uniforme. Já no início do século XIX, as pesquisas de Karsten esclareceram que a diferença entre ferro, aço e gusa estava diretamente relacionada ao teor de carbono, um avanço que permitiu maior precisão no controle das propriedades das ligas metálicas. Mais tarde, em 1868, Robert Mushet introduziu o uso de tungstênio no aço, conferindo-lhe maior dureza sem a necessidade de têmpera. Essa inovação originou o primeiro aço rápido, essencial para ferramentas de corte, pois mantinha a afiação mesmo após longos períodos de uso (Vale, 2011).

A industrialização e o avanço tecnológico impulsionaram a diversificação das ligas metálicas e o aprimoramento dos tratamentos térmicos (Chiaverini, 2008). A criação de aços-ferramenta, por exemplo, foi adaptada para atender às necessidades específicas da indústria, sendo aplicados em ferramentas manuais, peças de trabalho a quente e utensílios de corte. A evolução contínua dos métodos de aquecimento e resfriamento permitiu a produção de materiais mais versáteis e com propriedades otimizadas (Nunes, 2020).

Atualmente, o tratamento térmico é um processo amplamente utilizado para modificar as propriedades de ligas metálicas, sejam elas ferrosas ou não ferrosas. Realizado em condições controladas, ele envolve etapas de aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento. O avanço das técnicas de tratamento térmico reflete a constante busca da humanidade por materiais que atendam às exigências industriais e tecnológicas, consolidando seu papel essencial na engenharia e na manufatura moderna (Vale, 2011).

4.1 TIPOS DE TRATAMENTOS, DIFERENÇAS E APLICAÇÕES

Os tratamentos térmicos são classificados de acordo com o objetivo final e os métodos empregados, sendo os principais tipos: recozimento, têmpera, revenimento, normalização. Cada um desses tratamentos apresenta características específicas, bem como diferenças nas etapas de execução e nas propriedades resultantes do material tratado (Chiaverini, 2008).

O recozimento é um processo que visa a recuperação da estrutura cristalina do material após deformações ou tratamentos anteriores que possam ter gerado tensões internas. Esse método envolve o aquecimento da peça a uma temperatura controlada, seguido de resfriamento lento, geralmente em forno. O objetivo principal é suavizar o material, aumentando sua ductilidade e reduzindo sua dureza, o que facilita processos subsequentes, como conformação mecânica (Alves, 2011).

Esse tipo de tratamento é subdividido em diferentes categorias, conforme o objetivo e as condições de execução. Esses tipos incluem recozimento de alívio de tensões, recozimento para recristalização, recozimento para homogeneização, recozimento pleno, recozimento isotérmico ou cíclico e recozimento por esferoidização. Cada modalidade atende a demandas específicas, como melhorar a ductilidade, reduzir tensões internas, ou homogeneizar a estrutura do material.

Os tratamentos de recozimento para alívio de tensões e recristalização são aplicáveis a qualquer tipo de liga metálica, sendo particularmente úteis para corrigir deformações causadas por processos de conformação a frio ou a quente. Já o recozimento para homogeneização é indicado principalmente para peças fundidas, pois visa eliminar segregações químicas e promover maior uniformidade estrutural. O recozimento pleno e o isotérmico são amplamente utilizados para aços em geral, adaptando suas propriedades para diferentes aplicações industriais (Vale, 2011).

Essas características tornam os tratamentos térmicos de recozimento uma ferramenta indispensável na engenharia de materiais, promovendo o equilíbrio entre desempenho mecânico, funcionalidade e custo, dependendo da aplicação específica do componente tratado (Nunes, 2020).

Já a têmpera é um tratamento destinado a aumentar a dureza e a resistência do material. Consiste em aquecer a peça até uma temperatura acima da zona crítica (normalmente na faixa austenítica) e resfriá-la rapidamente em meios como água, óleo ou ar. Esse resfriamento abrupto gera uma estrutura martensítica, que é extremamente dura, mas também pode ser frágil. Por isso, a têmpera é geralmente seguida pelo revenimento, um processo de aquecimento controlado a temperaturas mais baixas, com o objetivo de aliviar tensões internas e melhorar a tenacidade sem comprometer significativamente a dureza adquirida (Oliveira, 2007).

A normalização, por sua vez, é realizada para homogeneizar a estrutura do material, melhorando suas propriedades mecânicas. A peça é aquecida a uma temperatura acima da zona crítica e resfriada ao ar. Esse tratamento resulta em uma

microestrutura mais uniforme, eliminando efeitos de tratamentos térmicos anteriores ou de processos de fabricação, como fundição ou soldagem (Vale, 2011).

A tabela a seguir apresenta resumo com os tipos de tratamento, bem como suas temperaturas e objetivos.

1 - Tipos de tratamento térmico para o aço SAE 1045

Tratamento térmico	Faixa de temperatura (°C)	Tempo (min.)	Meio de resfriamento	Objetivo
Recozimento	800 – 850°C	30	Resfriamento lento, forno	Reduzir tensões internas, aumentar a ductilidade e melhorar a usinabilidade.
Normalização	850 – 900°C	120	Resfriamento ao ar	Refinar grãos, melhorar a resistência mecânica e tenacidade.
Têmpera	820 – 860°C	120	Resfriamento rápido em óleo ou água	Aumentar a dureza e resistência mecânica.
Revenimento	150 – 650°C	90	Resfriamento ao ar	Ajustar dureza e alívio de tensões após a têmpera.

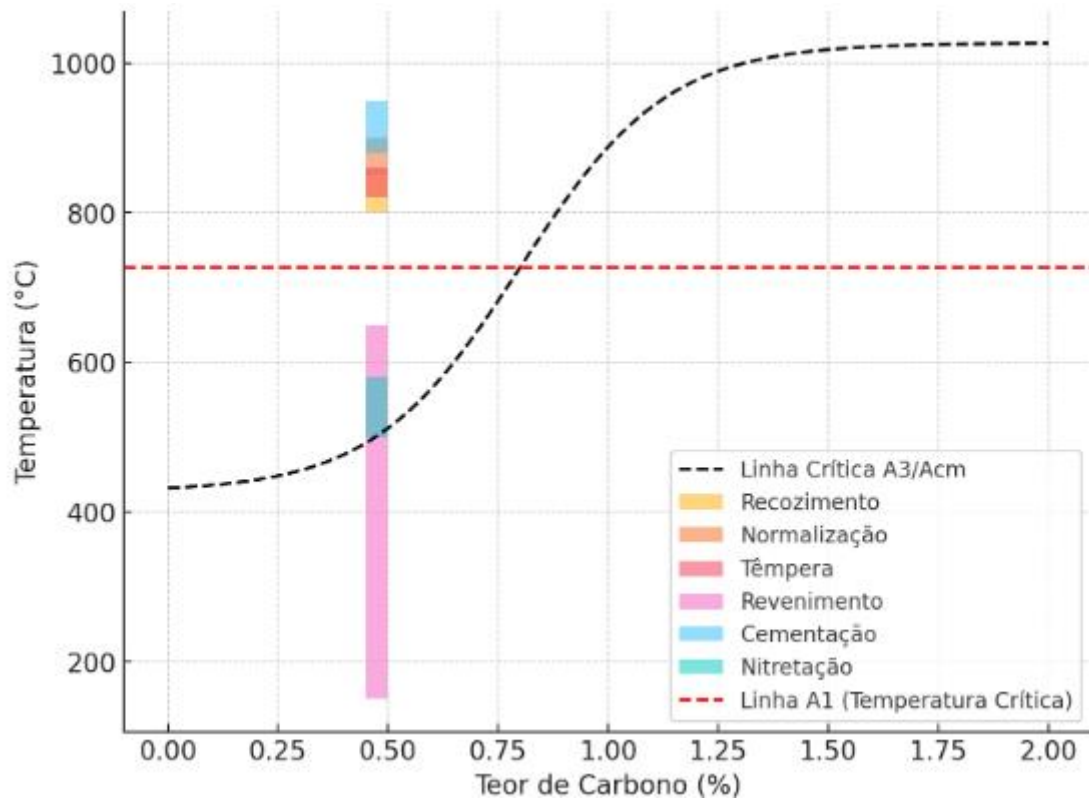
Fonte: Autor (2025).

A principal diferença entre esses tratamentos está no objetivo e nos métodos empregados. Enquanto o recozimento busca melhorar a usinabilidade e reduzir tensões internas, a têmpera e o revenimento são voltados para o aumento da dureza e da resistência mecânica. A normalização se destaca pela sua capacidade de uniformizar as propriedades do material (Vale, 2011).

As aplicações desses tratamentos variam conforme as necessidades da indústria. O recozimento é amplamente utilizado em processos de fabricação que envolvem estampagem ou conformação, enquanto a têmpera e o revenimento são comuns em ferramentas de corte, componentes automotivos e equipamentos que exigem alta resistência ao desgaste. A normalização é frequentemente empregada em peças estruturais e componentes forjados.

O gráfico a seguir apresenta de maneira visual as informações sobre a temperatura ideal para cada tratamento.

Figura 1 - Gráfico de temperatura para os tratamentos térmicos



Fonte: Autor (2025).

Compreender os tipos de tratamentos térmicos, suas diferenças e aplicações é fundamental para selecionar o processo mais adequado para cada material e finalidade, garantindo a eficiência e a durabilidade dos produtos.

4 METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foram preparadas cinco amostras de aço SAE 1045, sendo uma delas sem tratamento térmico destinada à caracterização do material em seu estado original, e quatro submetidas aos processos de tratamentos térmicos (recozimento, normalização, têmpera e revenimento).

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foi realizada a preparação de uma amostra sem tratamento térmico para caracterização inicial do material. Essa amostra serviu como referência para comparação com as demais submetidas a tratamentos térmicos. As amostras foram submetidas a lixamento manual utilizando lixas de granulometria 220, 360, 400, 600 e 1200, seguidas de polimento com alumina e pano para garantir uma superfície adequada para análise microestrutural.

Em seguida, foi realizado o ataque químico com Nital 5%, a fim de evidenciar a microestrutura do material. As imagens foram obtidas por meio de um microscópio óptico OLYMPUS, modelo CX31. A microdureza das amostras foi determinada utilizando um microdurômetro SHIMADZU, modelo HMV, com uma carga de 4,903N e um tempo de 15 segundos.

4.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos foram realizados em um forno JUNG, modelo LT 83013, conforme os parâmetros estabelecidos para cada processo. A Tabela 2 apresenta as características dos tratamentos aplicados e as dimensões das amostras resultantes.

Tabela 2 - Características dos tratamentos térmicos aplicados no aço SAE 1045

Tratamento Térmico	Temperatura (°C)	Tempo de Aquecimento (min)	Meio de Resfriamento	Medidas da Amostra E (mm) x D (mm)
Sem Tratamento	-	-	-	6,2 x 19
Recozimento	845	30	Resfriamento lento no forno	6,4 x 19

Normalização	908	120	Resfriamento ao ar	6,0 x 19
Têmpera	900	120	Resfriamento em água	6,2 x 19
Revenimento	300	90	Resfriamento ao ar	6,0 x 19

Fonte: Autor (2025).

Os parâmetros de temperatura e tempo de aquecimento foram definidos de acordo com a literatura técnica para o aço SAE 1045 (Machado *et al.*, 2014), buscando obter microestruturas distintas e avaliar suas influências na dureza do material. Após os tratamentos térmicos, todas as amostras passaram pelo mesmo processo de lixamento, polimento e ataque químico para garantir a uniformidade na análise microestrutural.

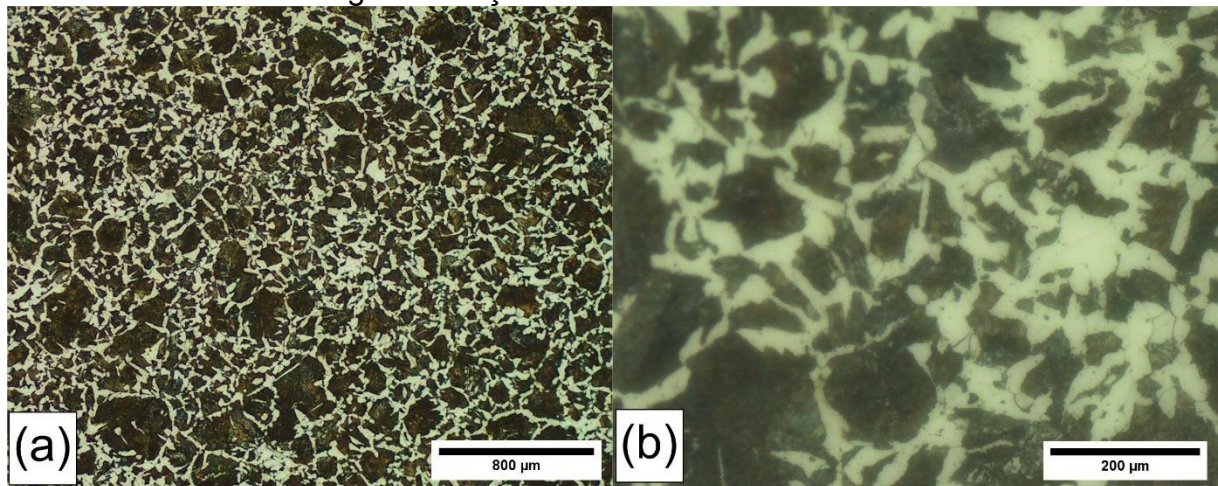
Dessa forma, a metodologia adotada permitiu avaliar, de maneira sistemática, os efeitos dos tratamentos térmicos no aço SAE 1045, fornecendo dados relevantes para a compreensão das variações microestruturais e mecânicas resultantes do processo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise microestrutural e a medição da microdureza permitiram avaliar as alterações provocadas pelos diferentes tratamentos térmicos no aço SAE 1045. A comparação entre as amostras sem tratamento e as submetidas aos processos térmicos revelou mudanças significativas nas propriedades mecânicas e estruturais do material.

A Figura 2 (a-b) apresenta a microestrutura do aço SAE 1045 (aumentada em 100x e 400x respectivamente) em seu estado original, sem tratamento térmico.

Figura 2 - Aço SAE 1045 sem tratamento

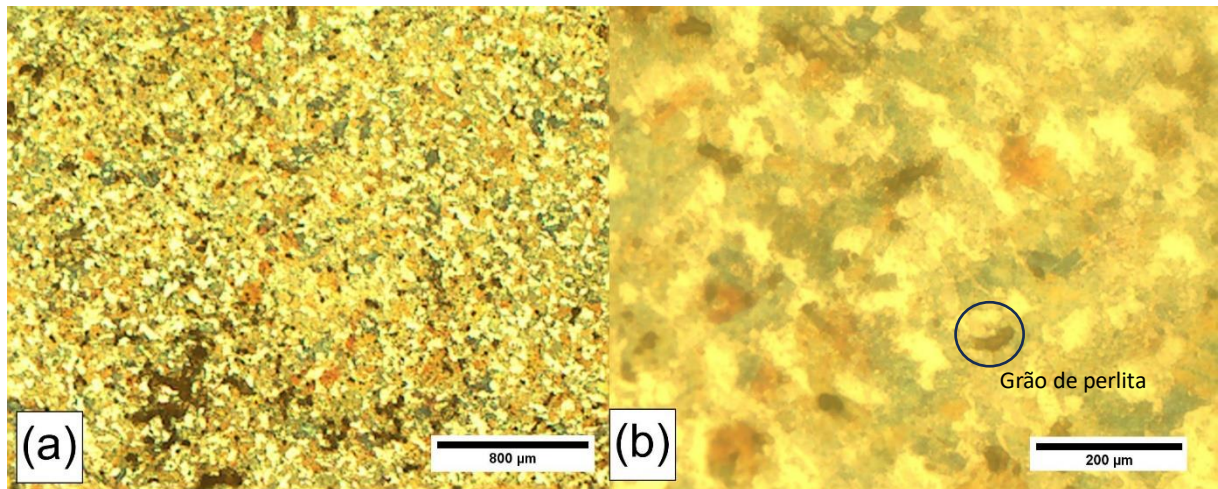


Fonte: Autor (2025).

Observa-se a presença de uma microestrutura composta predominantemente por ferrita (α) (fase clara) e perlita (fase escura), característica dos aços hipoeutetoides (Gallo, 2006). A distribuição da perlita ocorre de forma irregular, com regiões onde as lamelas estão mais agrupadas, o que impacta diretamente na dureza do material (Silva, 2020). Essa condição inicial resultou em uma microdureza média de 272 HV.

Para o tratamento térmico de recozimento obteve-se como principal efeito a redução da dureza e a homogeneização da microestrutura. A Figura 3 (a-b, aumentadas em 100x e 400x respectivamente), ilustra as mudanças estruturais promovidas pelo processo.

Figura 3 - Amostras aço SAE 1045 submetidas ao recozimento



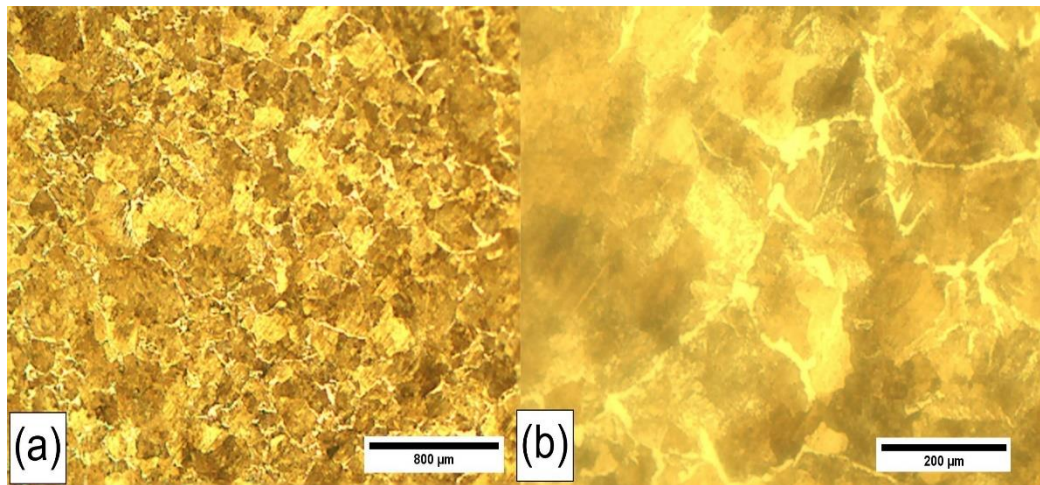
Fonte: Autor (2025).

Conforme observado na Figura 3 (a), a microestrutura tornou-se mais uniforme, com um aumento na fração volumétrica de ferrita. Enquanto a figura 3 (b), percebe-se uma redução dos tamanhos dos grãos de perlita, tornando-a parcialmente esferoidizada (Bramfitt, 1998).

Essa transformação ocorre porque, durante o tratamento térmico, a peça é aquecida a uma temperatura específica e resfriada lentamente, permitindo que a estrutura cristalina do aço se reorganize de forma mais homogênea. Como resultado, os defeitos cristalinos e as tensões residuais geradas por processos anteriores, como conformação mecânica e soldagem, são minimizados (Souza; Silva, 2018). Como consequência, houve uma redução significativa na microdureza média, passando para 168 HV, confirmando a expectativa teórica de que o recozimento reduz a dureza e melhora a usinabilidade do material.

A Figura 4 (a-b, aumentadas em 100x e 400x) apresenta a microestrutura resultante do processo de normalização.

Figura 4 - Amostras submetidas a normalização

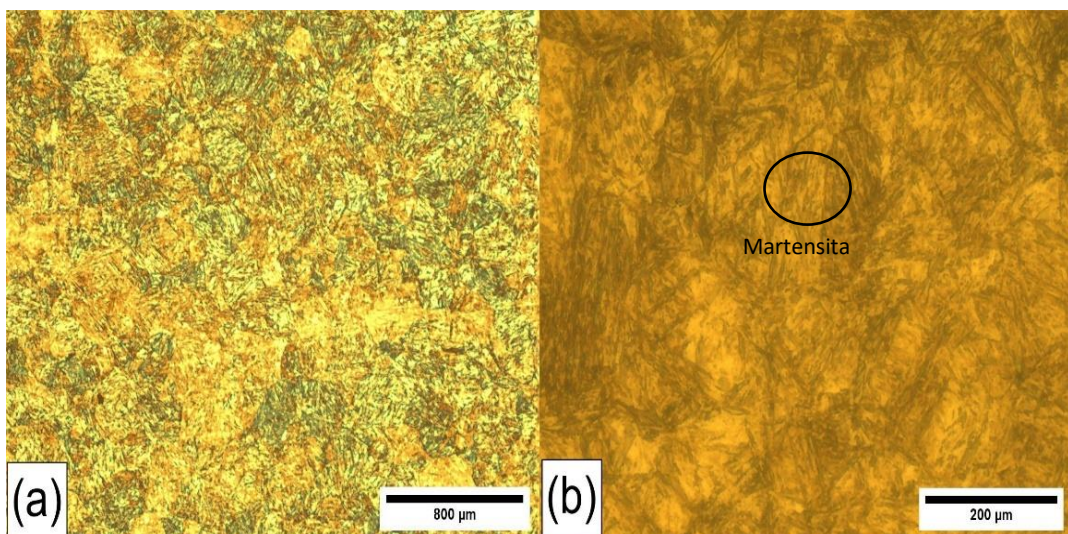


Fonte: Autor (2025).

Nota-se que o material apresentou uma microestrutura composta por grãos refinados de ferrita e perlita, o que melhora a resistência mecânica em relação ao recozimento. A normalização promove um resfriamento mais rápido ao ar, resultando na formação de perlita mais fina e distribuída uniformemente. Esse refinamento estrutural contribuiu para uma microdureza média de 246 HV. Esse resultado está alinhado com Callister Junior (2012), que aponta a normalização como um tratamento térmico que melhora a resistência mecânica sem comprometer excessivamente a ductilidade do material.

A Figura 5 (a-b), mostra a microestrutura obtida após a realização do processo de têmpera.

FIGURA 5 - AMOSTRAS APÓS A TÊMPERA

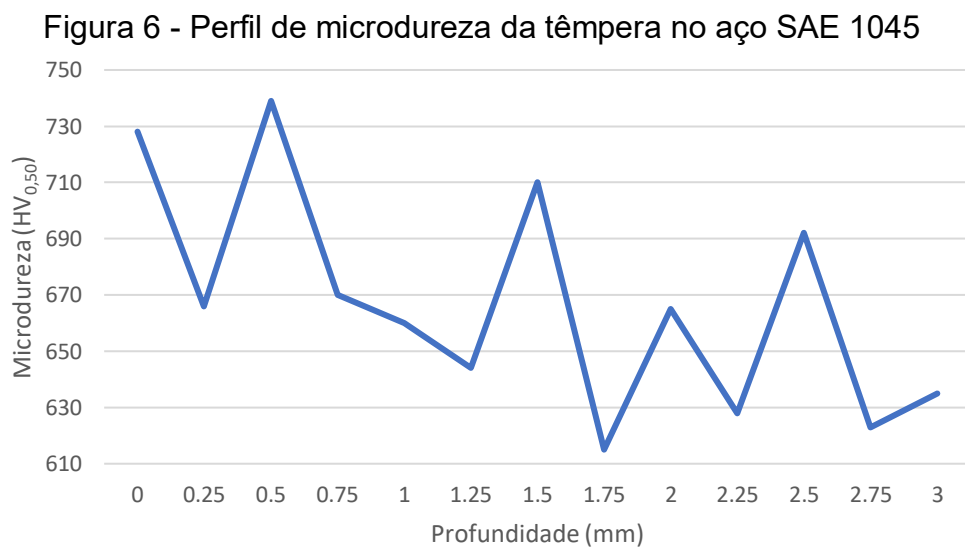


Fonte: Autor (2025).

Observa-se na figura 5 (b) a formação predominante de martensita (círculo vermelho), uma microestrutura extremamente dura e quebradiça, caracterizada por sua aparência acicular. De acordo com Novikov (1994), devido ao resfriamento brusco em meio adequado, como óleo ou água, ocorre a transformação rápida da austenita em martensita, o que justifica o aumento expressivo da dureza.

A microdureza média registrada para essa amostra foi de 728 HV. Esse aumento significativo confirma a eficácia da têmpera na elevação da resistência mecânica do aço, porém com a desvantagem de torná-lo mais quebradiço, o que exige a aplicação de um revenimento posterior para melhorar a tenacidade do material (Nunes, 2020).

O gráfico abaixo representa o perfil de microdureza da amostra de aço SAE 1045 submetida à têmpera. A microdureza foi medida a cada 0,25 mm, da superfície até 3 mm em direção ao centro da amostra.



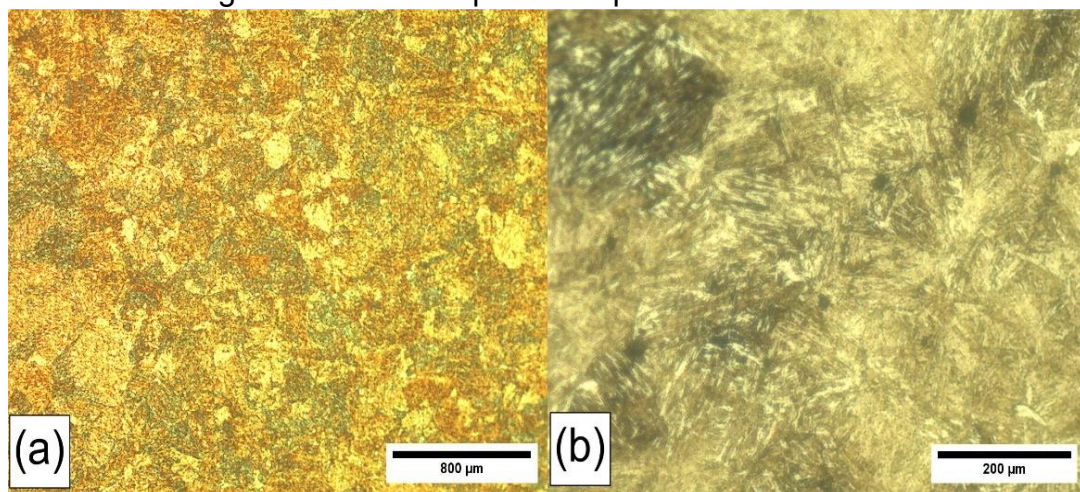
Fonte: Autor (2025).

Observa-se que a microdureza apresenta variações ao longo da profundidade, com valores que oscilam entre 615 HV e 739 HV. A superfície da amostra iniciou com uma dureza média elevada (728 HV), característica típica da martensita formada pela têmpera. No entanto, à medida que se avança para o interior da amostra, ocorrem flutuações nos valores, o que pode ser atribuído a variações na taxa de resfriamento, composição microestrutural e possíveis heterogeneidades no material (Santos, 2021).

Essas oscilações são comuns em tratamentos de têmpera, principalmente quando o resfriamento não é perfeitamente uniforme ou quando há diferenças na absorção de calor durante o processo. Mesmo assim, os valores mantêm-se consideravelmente altos, confirmando a eficácia do tratamento na geração de uma estrutura martensítica endurecida (Nunes, 2020).

Após a têmpera, o revenimento (Figura 7 a-b) foi realizado com o objetivo de reduzir a fragilidade do material e conferir um melhor equilíbrio entre resistência e ductilidade (Santos, 2021).

Figura 7- Amostra após a têmpera e o revenimento

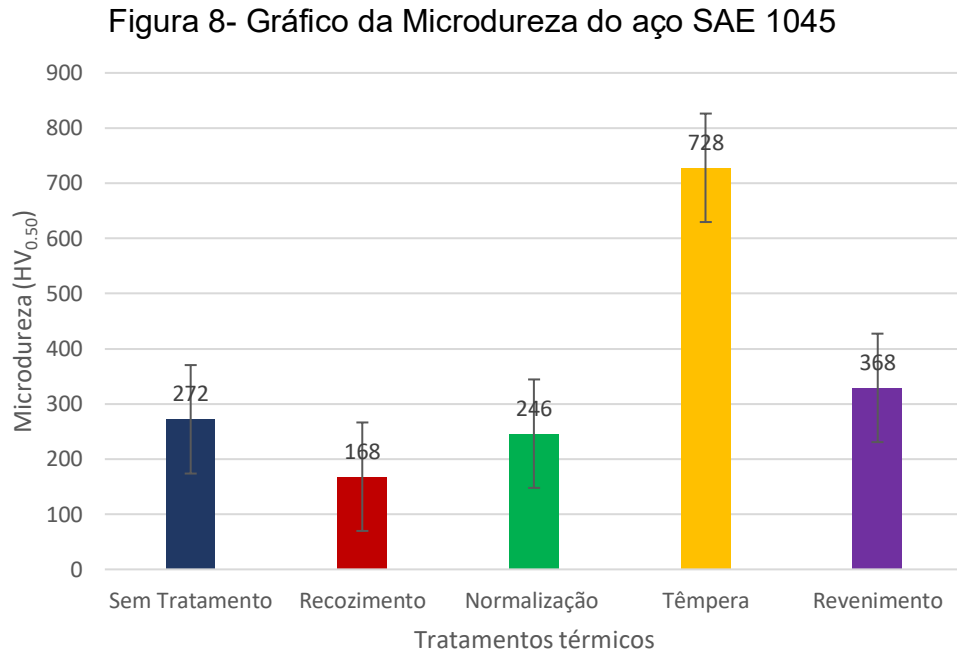


Fonte: Autor (2025).

A Figura 7, exibe a microestrutura obtida, onde se observa a presença de martensita revenida, caracterizada por uma aparência menos acicular e uma maior homogeneidade na distribuição dos constituintes. Essa mudança estrutural resultou em uma redução na dureza média para 368 HV.

Esse resultado está de acordo com a literatura, que aponta o revenimento como um processo essencial para ajustar as propriedades mecânicas do aço temperado, reduzindo tensões internas e melhorando sua tenacidade (ASM Handbook, 2014).

O gráfico a seguir representa os valores da microdureza para cada tratamento térmico realizado.



Fonte: Autor (2025).

Os valores de microdureza obtidos para cada tratamento térmico demonstram as mudanças esperadas conforme a literatura. O aço sem tratamento apresentou dureza intermediária, enquanto o recozimento reduziu significativamente a dureza e melhorou a usinabilidade (Nunes, 2020). A normalização resultou em uma estrutura mais fina e resistente, enquanto a têmpera promoveu um aumento expressivo da dureza devido à formação da martensita (Oliveira, 2007). O revenimento, por sua vez, ajustou essa dureza, tornando o material menos frágil e mais adequado para aplicações estruturais (Nunes, 2020).

Esses resultados confirmam que a escolha do tratamento térmico adequado depende diretamente da aplicação desejada para o material. O recozimento é indicado para processos que exigem alta usinabilidade, enquanto a normalização melhora a resistência mecânica sem comprometer a ductilidade (Santos, 2021). Já a têmpera e o revenimento são essenciais para aplicações que exigem elevada dureza, resistência ao desgaste e tenacidade controlada (Nunes, 2020).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo a análise da microestrutura e da microdureza do aço SAE 1045 submetido a diferentes tratamentos térmicos, permitindo a compreensão das mudanças nas propriedades do material em função das transformações microestruturais ocorridas durante os processos. A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que cada tipo de tratamento térmico proporcionou alterações significativas nas características do aço, influenciando sua dureza e estrutura interna.

A amostra sem tratamento térmico apresentou uma microestrutura composta por ferrita e perlita, com uma média de microdureza de 272 HV. Após o recozimento, houve uma notável redução da dureza para 168 HV, acompanhada por uma estrutura mais homogênea e esferoidizada, favorecendo a usinabilidade do material. Já o processo de normalização resultou em uma microestrutura refinada, conferindo uma dureza média de 246 HV, valor próximo ao da amostra sem tratamento, mas com propriedades mecânicas melhoradas para aplicações estruturais.

O tratamento térmico de têmpera gerou um aumento expressivo da microdureza, atingindo uma média de 728 HV, devido à formação de martensita, o que confere alta resistência mecânica, porém com maior fragilidade. O revenimento, por sua vez, reduziu a dureza para 368 HV, proporcionando um equilíbrio entre resistência e ductilidade, tornando o material mais adequado para aplicações que exigem maior tenacidade.

Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, confirmando as características esperadas para cada tipo de tratamento térmico aplicado ao aço SAE 1045. Dessa forma, este estudo reforça a importância da escolha adequada do tratamento térmico para atender às exigências mecânicas e operacionais de cada aplicação industrial. Sobretudo, a metodologia utilizada demonstrou-se eficaz na caracterização das amostras, contribuindo para uma melhor compreensão dos efeitos térmicos sobre o comportamento do material.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios adicionais, como testes de impacto e tração, a fim de complementar a análise das propriedades mecânicas do aço tratado termicamente. Sobretudo, a investigação de diferentes tempos de tratamento e taxas de resfriamento pode fornecer um entendimento ainda mais aprofundado sobre as variáveis que influenciam o desempenho do material.

REFERENCIAS

ALVES, Jorge Lino. **Materiais de construção mecânica I**. Porto: Departamento de Engenharia Mecânica, 2011. 260 slides, color. Disponível em: https://estudomec.info/files/MCM1_Aulas_1-6_JL.pdf. Acesso em: 29 dez. 2024.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook**, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. 9. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2014.

BRAMFITT, Bruce L. **Structure/Property Relationships in Irons and Steels**. Metals Handbook Desk Edition, Second Edition J.R. Davis, Editor, p 153-173, 1998.

CALLISTER JUNIOR, Willian D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 8. Ed. 2012.

CARUSO, João. **Tratamento térmico**. São Paulo: CEFET - SP, 2004.

CESAR NETO, Benedito Vieira. **Comparação de junta soldada aço carbono/aço inox utilizando como metal de adição aço carbono e aço inox**. Guaratinguetá: [s.n.], 2014. 67 f.: il. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini. Bibliografia: f. 59.

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

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de Aço: conceitos, técnicas e linguagem**. 2. ed. São Paulo: Zigurate Editora, 1998.

DWIVEDI, Deepak; LEPKOVÁ, Kateřina; BECKER, Thomas. Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 7, n. 8, p. 4580-4610, out. 2017. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c6ra25094g>.

GALLO, Giulliano B. **Influência do Tratamento Térmico sobre a Tenacidade de um Aço AISI SAE 1045 com Médio Teor de Carbono Avaliado por Ensaio de Impacto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, p. 115, 2006.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **História do aço**. 2022. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/historia-do-aco/>. Acesso em 29 dez. 2024.

ISHTIAQ, Muhammad *et al.* Microstructural, mechanical, and electrochemical analysis of carbon doped AISI carbon steels. **Applied Microscopy**, [S.L.], v. 52, n. 1, p. 50-71, 20 out. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s42649-022-00079-w>.

ISLAM, Tariq; RASHED, Hossain M. M. A. Classification and Application of Plain Carbon Steels. **Reference Module In Materials Science And Materials Engineering**, [S.L.], v. 2, n. 2, p. 322-345, jul. 2019. Elsevier.
<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.10268-1>.

KARIMI, Milad. Review of Steel Material Engineering and Its Application in Industry. **J. Eng. Ind. Res.** v.4, n. 1, p. 61-67, 2023.

LESLIE, W. C. **The physical metallurgy of steels**. London: McGraw-Hill International Book Co, 1982.

MACHADO, N. T. B. *et al.* **Análise das propriedades mecânicas do aço 1045 nitretado a plasma**: com e sem tratamento de revenimento. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2014. p. 5426-5433.

MARTINS, Danilo. **1020 versus 1045**: Qual é o Melhor Aço para cada Aplicação? 2024. Disponível em:
<https://www.acostaruma.com.br/blog/aco-1020-versus-aco-1045/>. Acesso em: 01 fev. 2025.

MCCLEMENTS, Dean. CONNIFF, Megan. **All About Carbon Steel as a Manufacturing Material**. Xometry, 2022. Disponível em:
<https://www.xometry.com/resources/materials/carbon-steel/>, acesso em 28 dez. 2024.

MECELIS, Guilherme Rosati. **Caracterização Mecânica e Microestrutural de Aços Microligados Processados Industrialmente**. 2017. 55 f. Dissertação (Mestrado)- Curso de mecânica, UNESP- Ilha Solteira, 2017.

NOVIKOV, I. **Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais**. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1994.

NOVOTNY, P. M. Tool and Die Steels. **Encyclopedia Of Materials: Science and Technology**, [S.L.], v. 2, n. 7, p. 9384-9389, jun. 2001. Elsevier.
<http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/01697-1>.

NUNES, Wenslainy Rodrigues. **Caracterização estrutural e microestrutural do aço SAE 1045 submetido a tratamento térmico**. 2020. 65 f. Dissertação (Mestrado)- Curso de engenharia aplicada e sustentabilidade, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, 2020.

OKOKPUJIE, Imhade P. *et al.* Behavioural Study of High Carbon Steel Material in Hot and Cold Working Media: a review. **E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 430, n. 12, p. 01210, out. 2023. EDP Sciences.
<http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202343001210>.

OLIVEIRA, Claudia Santos de; DENTI, Guilherme Boynard. **Avaliação da tenacidade ao impacto da região revenida pelo passe duplo em soldagem smaw do aço AISI 1045**. 2007. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

OLIVEIRA, A. R. **Tratamento térmico**. Pará: IFPA, 2007.

SANTOS, Hedipo Pereira dos. **Caracterização microestrutural dos aços 1020, 1045, 5160, 8620, após os determinados tipos de tratamentos térmicos de têmpera, revenimento, normalização e recozimento**. 2021. 76 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

SILVA, Rodrigo de Barros. **Influência da camada cementada no processo de soldagem por fricção fw radial no aço 1045**. Pindamonhangaba. 2020. 58 f. Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia em soldagem) - Faculdade de Tecnologia, 2020.

SOUZA, Dougla de Assis; SILVA, Geane. Análise da microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 1045 termicamente tratado. **Revista Perspectivas Online: Exatas e Engenharias**. [S.L], v. 8, n. 22, 2018.

STROHAECKER, Telmo Roberto; FRAINER, Vitor José. **Princípios de tratamentos térmicos**. Rio Grande do Sul, 2003.

VALE, Rafael Menezes do. **Tratamento térmico**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2011. 130 p.

WONDRIS, E.F. *et al.* "**Steel**". Encyclopedia Britannica, 19 nov. 2024, <https://www.britannica.com/technology/steel>. Acesso em 28 dez. 2024.