

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Lucas Eduardo da Silva

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DURANTE TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO
SAE 1045.**

Betim

2023

LUCAS EDUARDO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DURANTE TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO
SAE 1045.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Minas Gerais– *Campus* Betim
como requisito parcial para a obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida
Carvalho

Betim

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

S586a Silva, Lucas Eduardo da
Avaliação da influência da temperatura e do tempo nas
propriedades mecânicas durante tratamento térmico do aço SAE
1045 / Lucas Eduardo da Silva. – 2023.
72 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Minas Gerais, Câmpus Betim, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

1. Tratamento térmico. 2. Aço SAE 1045. 3. Têmpera. 4.
Propriedades termomecânicas. 5. Engenharia mecânica. I. Lucas
Eduardo da Silva. II. Título.

CDU: 621.7



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

Aos 11 dias do mês de julho do ano de 2023, às 20:00 horas, sob a presidência do Professor **Gabriel Mendes de Almeida Carvalho**, o discente do Curso de Engenharia Mecânica, **Lucas Eduardo da Silva** R.A nº 0039009 do IFMG – Campus Betim, defendeu o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Avaliação da influência da temperatura e do tempo nas propriedades mecânicas durante tratamento térmico do aço SAE 1045**” e foi **APROVADO** com a nota **85,0**, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

Como foi aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações em formato pdf à Coordenação de TCC.

O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós apresentação de TCC até data estipulada pelo professor responsável pela disciplina, poderá ter a nota considerada zero e neste caso sua defesa de TCC será considerada nula. Também está ciente de que seu TCC poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação.

Assinam esta ata o presidente da banca professor Gabriel Mendes de Almeida Carvalho e os membros da banca, professor Fagner Guilherme Ferreira Coelho e o engenheiro Felipe Silveira Santos.

Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Fagner Guilherme Ferreira Coelho

Felipe Silveira Santos

Dedico este trabalho a Deus, a minha família, ao meu orientador e aos meus colegas de classe, pois graças a eles, fui capaz de chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a Deus.

Aos meus pais José e Aurelina, aos meus amigos Josimar e Gabriel, pelo apoio, confiança e paciência.

Ao programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais.

Aos amigos e professores do IFMG- Campus Betim em especial o meu orientador e Professor Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho.

RESUMO

O Tratamento térmico pode ser considerado como o processo de aquecimento ou resfriamento controlado dos materiais metálicos, e tem o objetivo de modificar suas propriedades físicas e mecânicas, sem modificar sua geometria final. Este trabalho pretende avaliar a influência da temperatura e dos tempos de têmpera e revenimento nas propriedades mecânicas do aço SAE 1045. Foi avaliada uma temperatura para têmpera e outra para o revenimento: respectivamente 850 e 550°C utilizando água e convecção forçada para o processo de têmpera. Para o revenimento, o resfriamento posterior foi realizado ao ar livre. Ambos os tratamentos térmicos foram realizados com a duração de 45 minutos, no entanto durante o desenvolvimento do trabalho, verificou-se que o tempo de duração dos tratamentos térmicos depende da massa e das dimensões do material em estudo. Portanto, a abordagem dos tempos utilizados não é adequada e precisa ser revista em trabalhos futuros. A avaliação das propriedades mecânicas foi realizada por meio de ensaios de tração, e os resultados foram comparados com trabalhos na literatura, utilizando o mesmo aço, mesmos tratamentos, porém com condições de temperatura diferentes.

Palavras-chave: Aço SAE 1045; Tratamento térmico; Têmpera; Revenimento.

ABSTRACT

Heat treatment can be considered as the controlled heating or cooling process of metallic materials, and aims to modify their physical and mechanical properties, without modifying their final geometry. This work intends to evaluate the influence of temperature and quenching and tempering times on the mechanical properties of SAE 1045 steel. A temperature for quenching and another for tempering was evaluated: respectively 850 and 550°C using water forced convection for the quenching process. For tempering subsequent cooling was carried out in the open air. Both thermal treatments were carried out with a duration of 45 minutes, however during the development of the work, it was verified that the duration of the heat treatments depends on the mass and dimensions of the material under study. Therefore, the approach of the times used is not adequate and needs to be reviewed in future works. The evaluation of the mechanical properties was carried out through tensile tests, and the result were compared with works in the literature, using the same steel, same treatments, but with different temperature conditions.

Keywords: Steel SAE 1045; Heat treatment; Quenching; Tempering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de equilíbrio Fe-Fe ₃ C.....	21
Figura 2: Curvas de transformação perlitica.	23
Figura 3: Efeito do tempo de aquecimento na profundidade de endurecimento por têmpera superficial.	25
Figura 4: Têmpera de flange, aquecimento a gás.....	26
Figura 5: Têmpera de flanges, forno giratório.	27
Figura 6: Exemplos de campos magnéticos e correntes induzidas por bobinas de indução.	28
Figura 7: Exemplo de aquecimento por indução.....	29
Figura 8: Técnica de aquecimento por indução. (a) aquecimento da peça. (b) resfriamento subsequente.	30
Figura 9: Variação da dureza no revenimento da martensita em ligas de Fe-C.....	32
Figura 10: Aspecto micrográfico de um aço temperado e revenido. Estrutura: Sorbita. Ataque reativo de nital. Ampliação: 1.000 vezes.	34
Figura 11: Curva de dureza em função da temperatura do aço 145.....	35
Figura 12: Engrenagens fabricadas com aço SAE 1045	36
Figura 13: Diagrama Tensão x Deformação.	38
Figura 14: Máquina de tração.....	39
Figura 15: Diagrama de Fases – Ferro-Cementita.	41
Figura 16: Materiais e equipamentos utilizados no trabalho. a) corpos de prova; b) máquina de ensaio de tração; c) alicate tenaz e luvas de proteção; d) forno mufla.	44
Figura 17: Dimensões da amostra para o ensaio Forma A.....	45
Figura 18: Peças em aquecimento (Têmpera).	47

Figura 19: Corpo de prova após resfriamento (Têmpera).....	48
Figura 20: Corpo de prova durante aquecimento (Revenimento).....	50
Figura 21: Corpos de prova durante resfriamento (Revenimento).....	50
Figura 22: Máquina de tração EMIC DL-30000 (IFMG)	51
Figura 23: Paquímetro Digimess Universal 0-200mm resolução 0,02mm.	52
Figura 24: Medição dos corpos de prova antes da tração. (a) R1, (b) T1 e (c) NR2.	54
Figura 25: Adaptações das bases de apoio das amostras utilizando solda. (a)T1, (b) T2, (c) R1 e (d) R2.....	56
Figura 26: Medição do Comprimento útil após o ensaio de tração. (a) NR1 e (b) R1.....	59
Figura 27: Estado de tensão de um material temperado.....	61
Figura 28: Trincas nos corpos de prova temperados e revenidos. a) T1; b) T2; c) R1; d) R2.	62
Figura 29: Propagação da trinca durante Tração – Amostra T2.	64
Figura 30: Corpo de prova após tração – Amostra R1.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química aço SAE 1045.....	37
Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço SAE 1045.	37
Tabela 3: Medições do comprimento útil do aço SAE 1045 temperado.....	53
Tabela 4: Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova NR1, NR2, T1, T2, R1 e R2.....	57
Tabela 5: Resultado do alongamento para os corpos de prova NR1, NR2, T1, T2, R1 e R2.	58
Tabela 6: Comparação dos resultados do trabalho com a literatura.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Rampa de aquecimento (Têmpera)	48
Gráfico 2: Rampa de aquecimento (Revenimento)	49
Gráfico 3: Gráfico de Tensão x Deformação.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- [CFC] Cúbica de Face Centrada;
- [TCC] Tetraédrica de Corpo Centrado;
- [CCC] Cúbica de Corpo Centrado;
- [NR1] Corpo de Prova Como Recebido 1;
- [NR2] Corpo de Prova Como Recebido 2;
- [T1] Corpo de Prova Temperado 1;
- [T2] Corpo de Prova Temperado 2;
- [R1] Corpo de Prova Revenido 1;
- [R2] Corpo de Prova Revenido 2;
- [kN] Kilo Newton;
- [N] Newton;
- [MPa] Mega Pascal;
- [L_F] Comprimento após tração;
- [L_0] Comprimento Inicial antes da tração;
- [A_l] Alongamento total;
- [Cr] Cromo;
- [Mo] Molibdênio;
- [W] Tungstênio;
- [V] Vanádio;
- [Nb] Níbio;
- [Si] Silício;
- [C] Carbono;
- [Mn] Manganês;
- [S] Enxofre;
- [P] Fósforo;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa	17
1.2. Objetivo geral	18
1.2.1. Objetivos específicos.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1. Tratamentos Térmicos	19
2.1.1. Conceitos dos Tratamentos Térmicos dos aços.....	19
2.1.2. Parâmetros de interferência dos Tratamentos Térmicos	20
2.1.2.1. Aquecimento	20
2.1.2.2. Tempo de Aquecimento.....	22
2.1.2.3. Resfriamento.....	22
2.1.2.4. Atmosfera de resfriamento.....	22
2.1.3. Têmpera.....	23
2.1.3.1. Têmpera Superficial	24
2.1.3.2. Têmpera por chama	26
2.1.3.3. Têmpera por indução.....	27
2.1.4. Revenimento.....	31
2.1.4.1. Influência do revenimento na dureza e tenacidade	32
2.2. Aço SAE 1045	36
2.3. Ensaio de Tração	37
2.3.1. Metalografia	39
2.3.1.1. Análises Metalográficas	40
2.3.1.2. Transformação de fases	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. Materiais.....	43
3.2. Métodos	43
3.2.1. Preparação dos Corpos de prova	45
3.2.2. Tratamento Térmico	46
3.2.2.1. Têmpera	47
3.2.2.2. Revenimento	49

3.2.3. Ensaio de tração	51
3.2.3.1. Pré-Carga e Medição do Comprimento útil das Amostras	52
3.2.3.2. Execução dos Ensaios.....	52
3.2.3.2.1. Registro do processo.....	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	68
6. REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A análise das propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais, tem grande parte de seus fundamentos ligados a ciências dos materiais e aos processos de fabricação. Os princípios e concepções permitem melhorias nas propriedades mecânicas dos materiais, como por exemplo sua resistência. Na maior parte das vezes, os materiais metálicos antes de serem aplicados na sua forma e função final na indústria, são submetidos a processos térmicos de aquecimento e resfriamento controlado. Estes processos são definidos como tratamentos térmicos ou tratamentos termoquímicos (CHIAVERINI, 1986). Segundo Vicente Chiaverini (2008), o Processo de Têmpera resume-se no aquecimento do material até uma temperatura superior a temperatura crítica (acima de 727°C), a duração do processo de têmpera depende de vários fatores, como o tipo de material, a espessura da peça, as propriedades desejadas e o meio de resfriamento utilizado. Esses fatores influenciam o tempo necessário para aquecer o material acima da temperatura crítica e resfria-lo rapidamente para obter a dureza desejada.

Logo após o aquecimento, o aço é resfriado abruptamente em água ou óleo, dessa forma a microestrutura do material é alterada novamente, passando de Austenítica para Martensítica (TCC), (KRAUSS, 1994). Como consequência dessas alterações da microestrutura do material, ocorre o aumento da dureza e resistência a tração, além de diminuição da tenacidade e ductibilidade, ocasionando trincas e deformações sem modificar sua geometria final (CHIAVERINI, 2008). Sendo assim, para solucionar o problema de fragilidade do material é realizado um tratamento térmico conhecido como Revenimento. Microestruturalmente, esse tratamento segrega o carbono da estrutura, desenvolvendo o que é chamado de Martensita Revenida além de Ferrita e Carbonetos (LIMA, 2007). Uma das principais melhorias proporcionadas pelo revenimento é a melhoria da tenacidade do material. No entanto, por meio do revenimento, ocorre uma redistribuição do carbono, que atua na redução da fragilidade, aumentando a capacidade de absorção de energia e resistência à fratura do aço. Isso resulta em um material mais tenaz, capaz de resistir a cargas e impactos sem se romper facilmente (KRAUSS, 1994).

Além da melhoria da tenacidade, o revenimento também contribui para a redução das tensões internas no material, resultantes do processo de tempera. Essas tensões residuais podem causar deformações, trincas e até mesmo falhas prematuras em componentes metálicos. O revenimento ajuda a aliviar essas tensões, minimizando o risco de falhas por fadiga ou ruptura.

Outra vantagem do revenimento é a melhoria da ductibilidade do material. A tempera pode deixar o aço mais rígido e menos maleável, o que pode ser indesejável em certas aplicações (KRAUSS, 1994).

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo da influência da variação de temperatura e tempo nas propriedades mecânicas e metalográficas do aço SAE 1045 durante o processo de têmpera e revenimento.

1.1. Justificativa

Este trabalho tem a proposta de verificar a influência das temperaturas de têmpera e revenimento e os tempos de processo aplicados ao tratamento térmico do aço SAE 1045. Este é um aço com teor de carbono de aproximadamente 0,45% e que apresenta média temperabilidade e boa tenacidade (DIETER, 1981). Essas características garantem ao aço SAE uma grande aplicabilidade sendo utilizado na fabricação de eixos, hastes e barras, engrenagens, componentes estruturais, ferramentas manuais dentre outras devido ao seu ótimo custo-benefício, e as boas propriedades mediante tratamentos térmicos. Porém cada tratamento térmico tem um conjunto de variáveis a serem avaliadas, possibilitando mudanças microestruturais no material, alterando suas propriedades.

Espera-se, então, que este estudo apresente uma diretriz para o correto processamento térmico deste aço. Podendo direcionar para diferentes aplicações com as melhores condições de temperaturas e tempos, assim como indicar as resistências mecânicas e a microestrutura da liga. Com um processo de fabricação mais assertivo, mais ágil é a produção e menor os gastos com perdas e conseqüente redução do custo de produção.

1.2. Objetivo geral

Este trabalho avaliou a influência da temperatura e tempo durante tratamento térmico do aço SAE 1045, visando entender sua influência nas propriedades mecânicas e fornecer orientações para o processo.

1.2.1. Objetivos específicos

Para atendimento ao objetivo geral, lista-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento em amostras de aço SAE 1045 em condições de temperatura e tempo definidos;
- Determinar as propriedades mecânicas para as diferentes condições de tratamento térmico;
- Relacionar o efeito das condições de temperatura e tempo com as propriedades mecânicas;
- Efetuar e conhecer as etapas do processo, assim como o funcionamento das máquinas envolvidas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda fundamentos necessários para realização do trabalho, características e conceitos dos tratamentos térmicos, propriedades do aço SAE 1045, ensaios mecânicos e análises metalográficas.

2.1. Tratamentos Térmicos

2.1.1. Conceitos dos Tratamentos Térmicos dos aços

De modo geral os tratamentos térmicos podem ser considerados como, um conjunto de processos de aquecimento e resfriamento ao qual os aços são submetidos, no qual as temperaturas e tempos de processo são controladas, com o objetivo de modificar as propriedades mecânicas do material (CHIAVERINI, 2008).

Para Chiaverini (2008), a alteração das propriedades dos aços depende de suas estruturas, sendo que cada estrutura apresenta características próprias. Os tratamentos térmicos apresentam grande importância principalmente nos aços de alto teor de carbono e elementos de liga. Estes aços são obrigados a passar por tratamento térmico antes de serem dispostos a suas finalidades. Ainda segundo Chiaverini (2008), os tratamentos térmicos apresentam os seguintes objetivos:

- Remoção de tensões (oriundas de esfriamento, trabalho mecânico ou outra causa);
- Alteração da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora da usinabilidade;
- Melhora da resistência ao desgaste;
- Melhora da resistência a corrosão;
- Melhora da resistência ao calor;
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Em geral os tratamentos térmicos não têm a capacidade de melhorar todas as características apresentadas acima. Ou seja, ao conseguir a melhora de uma característica simultaneamente se tem a queda de outra, como por exemplo: com a melhora da ductibilidade, tem se a queda da dureza e resistência a tração. Sendo assim deve-se avaliar com critério as características desejadas (ALBANO, 2012).

2.1.2. Parâmetros de interferência dos Tratamentos Térmicos

Albano (2012) lista alguns fatores essenciais para qualidade do tratamento térmico. São eles:

- Aquecimento: modifica a estrutura do grão e alivia as tensões do material;
- Tempo de aquecimento: influencia a dissolução de impurezas e também afeta o tamanho de grão;
- Resfriamento: pode ser realizado no próprio forno desligado ou através de meios mais severos, com soluções salinas com agitação severa, sendo que este tem papel fundamental para transformação austenítica.
- Atmosfera de aquecimento: a atmosfera de aquecimento do local empregado deve ser controlada para evitar oxidações e decarbonetação.

2.1.2.1. Aquecimento

Para Chiaverini (1988) e Oliveira (2014) um dos fatores importantes para o tratamento térmico é o aquecimento, pois ele causa mudanças das propriedades mecânicas dos materiais durante o processo de austenitização. Sendo assim, é necessário aquecer o material acima da temperatura crítica, permitindo dessa maneira a dissolução do carboneto de ferro no ferro gama.

Ainda segundo os mesmos autores, existem dois fatores que devem ser considerados durante o processo de aquecimento: velocidade de aquecimento e temperatura máxima de aquecimento.

A velocidade de aquecimento tem forte influência na alteração das propriedades mecânicas e deve ser controlada de acordo com as características do material, sendo que para materiais que detenham tensões internas ou residuais devido ao encruamento, o aquecimento deve ser mais demorado, pois ao contrário o risco do aparecimento de fissuras é grande. Os aços encruados, que são aços que passaram por processos de deformação plástica, como laminação a frio, trefilação ou estampagem, desenvolvem tensões internas ou residuais.

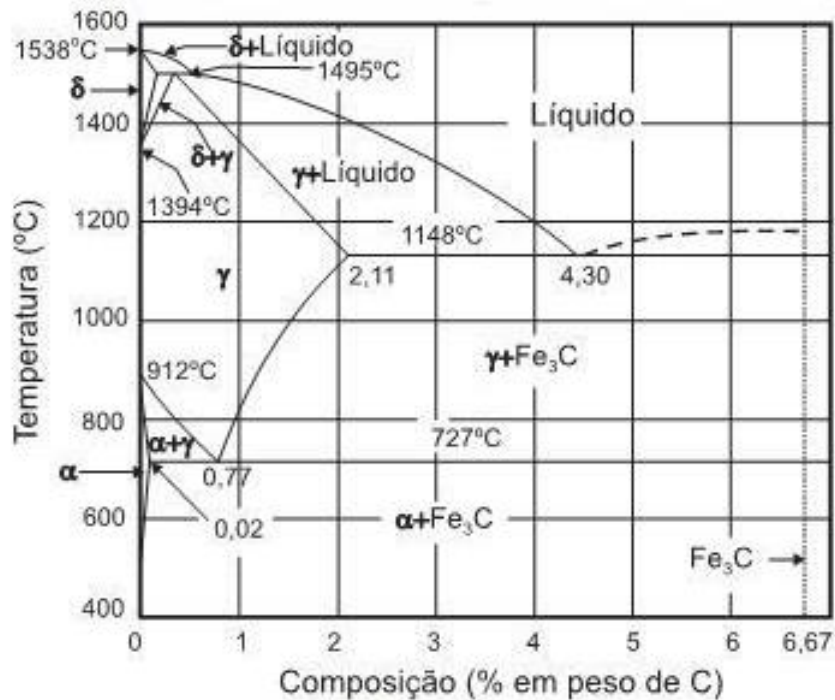
Portanto, ao aquecer esses aços, é importante evitar um tempo prolongado de aquecimento, a fim de evitar o crescimento excessivo do grão, que pode comprometer suas propriedades mecânicas (Chiaverini, 1988; Oliveira, 2014).

Chiaverini (1988) considera que a temperatura máxima de aquecimento está ligada ao tipo de processo, as características do material e ao objetivo final.

De acordo com Chiaverini (1988), os inconvenientes de um tamanho de grão excessivamente grande superam a falta de dissolução completa das fases no ferro gama. É necessário evitar temperaturas muito acima da linha superior (A3), embora seja aceitável uma margem de 50°C acima de A3 para aços com baixo teor de carbono. No caso dos aços com alto teor de carbono, é recomendável uma temperatura abaixo da linha A_{cm} , uma vez que essa linha se eleva com aumento de carbono. Portanto, a dissolução completa do carboneto no ferro gama resultaria em temperaturas muito altas e em um crescimento excessivo dos grãos da austenita, o que seria muito mais prejudicial do que a presença de carboneto não dissolvido.

A Figura 1 a seguir apresenta o diagrama de equilíbrio Fe-Cementita (Fe_3C) e as linhas A3 e A_{cm} mencionadas anteriormente (Oliveira, 2014)

Figura 1: Diagrama de equilíbrio Fe- Fe_3C .



Fonte: Chiaverini (1988).

2.1.2.2. Tempo de Aquecimento

Segundo Chiaverini (1988) e Oliveira (2014), o tempo também tem grande influência no processo, sendo que o tempo deve ser estipulado apenas a garantir a uniformidade da transformação em toda a região do material. Assim como a temperatura máxima, o tempo excessivo pode gerar problemas como o crescimento excessivo do grão e a oxidação do material.

2.1.2.3. Resfriamento

Chiaverini (1988) e Oliveira (2014) definem a etapa de resfriamento como ponto chave, pois através dela se determinará a microestrutura final. A velocidade do resfriamento tem função determinante no processo, podendo determinar a transformação microestrutural desde perlita até a martensita.

O resfriamento pode ser feito através do ar (dentro do forno) óleo e água. A escolha do tipo de resfriamento é feita através dos dados do material, como composição química, dimensão etc. (Chiaverini, 1988; Oliveira, 2014).

Outro fator de grande relevância para o processo é a taxa de resfriamento, determinada através do meio de resfriamento. Callister (2006) define a taxa de resfriamento através da severidade, classificando-as a partir dos meios de resfriamento. Com isso, a água é o meio mais severo, seguido pelo óleo e por último, ar. Segundo Chiaverini (1988) e Oliveira (2014) a severidade pode ser aumentada se houver a promoção de circulação ou alguma forma de movimentação do meio.

Ainda segundo Chiaverini (1988) a agitação em excesso do meio, pode ocasionar problemas como: tensões internas, empenamento etc. De modo geral meios de menor agitação são mais utilizados, como exemplo, ao ar parado, utilizando gases inertes como o hélio e o argônio, e através da salmoura, estes meios promovem uma melhor temperabilidade do material.

2.1.2.4. Atmosfera de resfriamento

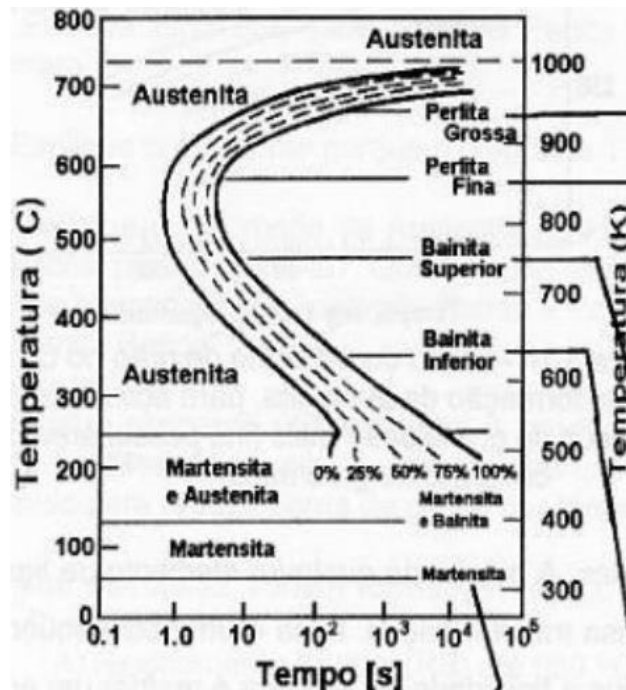
Para Chiaverini (1988) e Oliveira (2014) existem cuidados que devem ser tomados com a presença de alguns agentes como: oxigênio, vapor de água e anidrido carbônico, pois estes promovem a ocorrência de oxidação no aço.

De acordo com (Oliveira, 2014), no tratamento térmico dos aços é fundamental realizar uma cuidadosa avaliação da proporção ideal dos constituintes da atmosfera protetora. Essa medida visa evitar a oxidação, a descarbonetação e a carbonetação. Para alcançar esse objetivo, é recomendado o uso de uma atmosfera protetora ou controlada no interior do forno. Essa abordagem ajuda a prevenir a formação da casca de óxido e elimina a necessidade de métodos de limpeza. Além disso, contribui para garantir a uniformidade de dureza da superfície e resistência ao desgaste.

2.1.3. Têmpera

Durante a têmpera, o objetivo é obter alta dureza no material. Isso é alcançado aquecendo-o até a fase de austenitização (815°C a 870°C) e, em seguida, resfriando-o rapidamente. Esse resfriamento rápido evita a formação de bainita e perlita e promove a formação de martensita, uma estrutura de alta densidade tetragonal que oferece maior dureza. A bainita é formada em resfriamentos moderados e a perlita em resfriamentos lentos, mas ambas não são tão duras quanto a martensita. Portanto, para altas durezas, é preferível evitar bainita e perlita e favorecer a formação de martensita através de um resfriamento rápido, como demonstrado na Figura 2 (Chiaverini, 1988).

Figura 2: Curvas de transformação perlítica.



Fonte: Chiaverini (2008).

Segundo Silva (2018), a aplicabilidade deste processo se expande a diversas ligas de ferro carbono. Na estrutura martensítica obtida é encontrada austenita no formato de agulhas, e carbono retido, configurando uma estrutura TCC.

A formação da martensita é extremamente ligada a velocidade de resfriamento, sendo muito utilizado meios de resfriamento como água e óleo. A composição química do material também tem influência na formação de martensita, sendo que alguns elementos de liga como o cromo, podem alterar a solubilidade do carbono na matriz ferrítica, obtendo dessa maneira estrutura martensítica durante o resfriamento ao ar (Nunes, 2012).

2.1.3.1. Têmpera Superficial

Uma das formas de têmpera muito utilizada na indústria é a têmpera superficial, que é mais conveniente que seu tratamento normal. Seu objetivo é garantir o endurecimento, aumento da resistência ao desgaste e à corrosão superficial (Chiaverini, 2008).

Por meio de tratamento térmico adequado, podemos produzir uma estrutura que seja dura na superfície, de forma que são obtidas excelentes resistências ao desgaste. Porém ao mesmo tempo preserva-se o núcleo dúctil e tenaz, que proporciona boa resistência à ocorrência de falha por impacto. (Askeland, 2014).

Chiaverini (2008) listam alguns fatores que influenciam na opção pela têmpera superficial em vez do processo normal:

- Dificuldade, sob os pontos de vista prático e econômico, de se tratar de peças com grandes dimensões nos fornos de tratamento térmico convencional.
- Possibilidade de endurecer apenas as áreas críticas de determinadas peças como guias de máquinas operatrizes, grandes cilindros, dentes de grandes engrenagens e etc.;
- Possibilidade de se utilizar aços mais econômicos, como aços carbono, no lugar de aços-liga;
- Possibilidade de melhorar a precisão na dimensão de peças planas, grandes ou delgadas, evitando-se o endurecimento total. Exemplos: êmbolos de cilindros hidráulicos e hastes;
- Possibilidade de controlar o processo, produzindo se desejável, variações nas profundidades do endurecimento ou de dureza, em secções diferentes da peça;

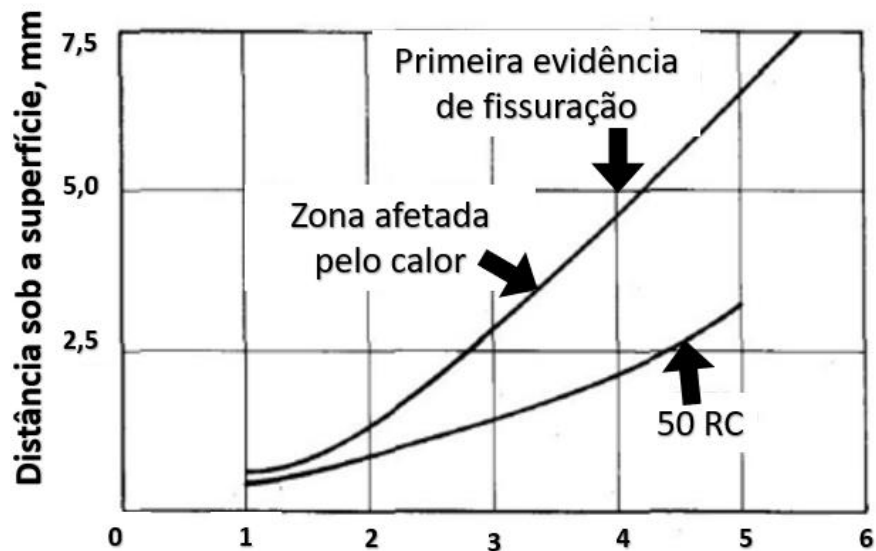
- Investimento no capital médio: no caso de adotar-se o endurecimento superficial por indução é bem menor em vez do endurecimento por chama.
- Diminuição dos riscos de aparecimento de fissuras com origem no resfriamento, após o resfriamento.

As principais propriedades resultantes da têmpera superficial são:

- Superfícies de alta dureza e resistência ao desgaste;
- Boa resistência a fadiga por dobramento;
- Boa capacidade para resistir cargas de contato;
- Resistência satisfatória ao empenamento.

A Figura 3 mostra, o gráfico de tempo de aquecimento vs distância da superfície para a têmpera superficial.

Figura 3: Efeito do tempo de aquecimento na profundidade de endurecimento por têmpera superficial.



Fonte: Chiaverini (2008).

Chiaverini (2008) ainda citam que existe outros ganhos na utilização desse processo, como a não necessidade do uso de fornos de aquecimento, uma maior produtividade de tratamento e uma flexibilidade no local de aplicação.

2.1.3.2. Têmpera por chama

A têmpera por chama é feita através do uso de uma chama de oxiacetileno, que aquece o material até uma temperatura superior a temperatura crítica, seguindo-se de um resfriamento rápido por jato de água. Como resultado se obtém o endurecimento da superfície até uma profundidade estipulada. (Chiaverini, 2008)

Segundo Chiaverini (2008) existem alguns métodos de aplicação do endurecimento superficial da têmpera por chama: O método progressivo é usado para endurecer grandes seções que não podem ser aquecidas de forma estática. O método giratório é aplicado a peças circulares ou semicirculares, girando-as para obter um aquecimento uniforme. O método combinado progressivo-giratório une os dois métodos anteriores, girando a peça enquanto a chama se move ao longo dela, aquecendo apenas uma faixa estreita da circunferência.

As Figuras 4 e 5 mostram exemplos de têmperas de flange por aquecimento a gás e por forno giratório.

Figura 4: Têmpera de flange, aquecimento a gás.



Fonte: Silva (2018).

Figura 5: Têmpera de flanges, forno giratório.

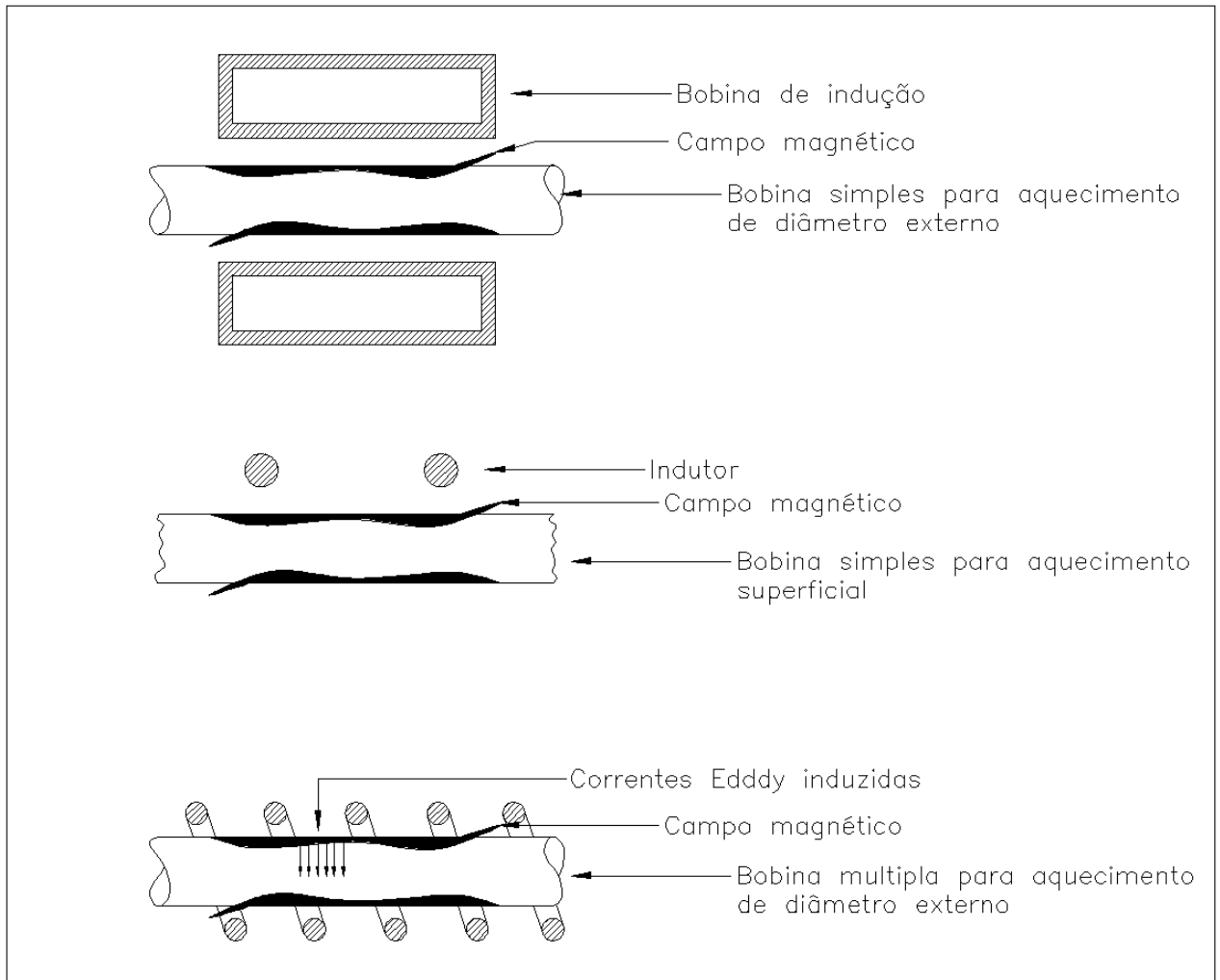


Fonte: Silva (2018).

2.1.3.3. Têmpera por indução

Segundo Chiaverini (2008) o aquecimento do material também pode ser realizado através de indução eletromagnética. Ainda segundo o mesmo autor, a geração de indução é definida como a corrente alternada que atravessa por um indutor ou bobina de trabalho. Dessa forma é criado um campo magnético concentrado, induzindo um potencial elétrico. Por fim, a resistência ao fluxo magnético gera o aquecimento. A Figura 6 mostra alguns exemplos de campos magnéticos e correntes de bobinas de indução, enquanto a Figura 7 mostra um exemplo de aquecimento por indução.

Figura 6: Exemplos de campos magnéticos e correntes induzidas por bobinas de indução.



Fonte: Adaptado de Chiaverini (2008).

Figura 7: Exemplo de aquecimento por indução.



Fonte: Silva (2018).

De acordo com Chiaverini (2008), a velocidade de aquecimento é dependente da intensidade do campo magnético. Para se realizar um aquecimento de baixa profundidade é necessário utilizar corrente de alta frequência.

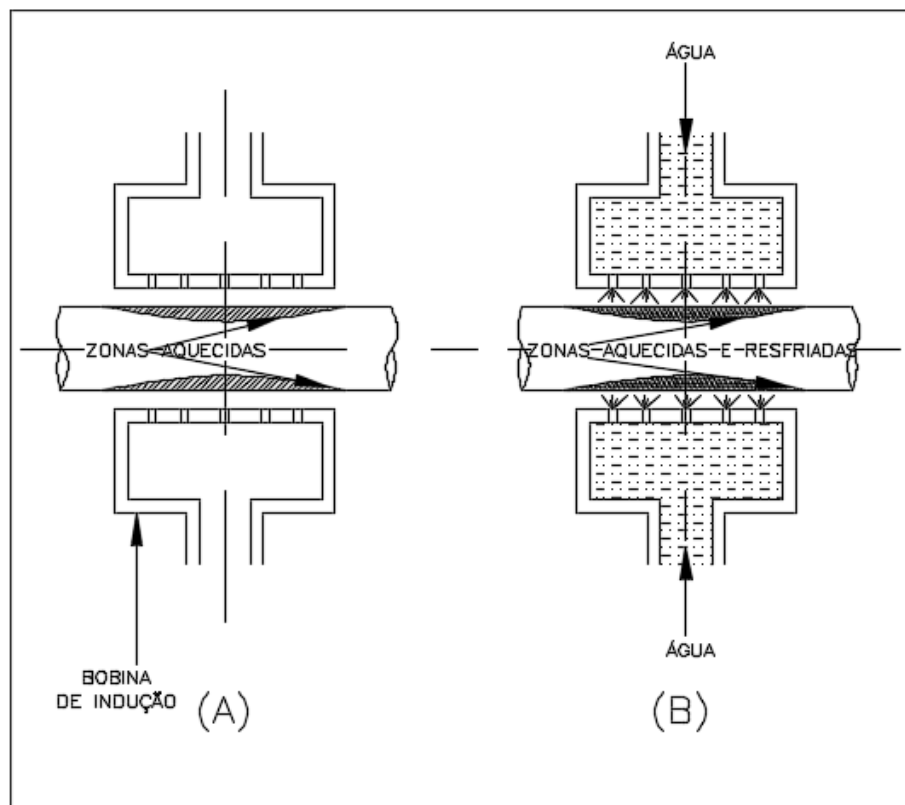
A maioria das aplicações que envolvem o endurecimento superficial exige uma alta densidade de potência (kW/cm^2) e ciclos de aquecimento curtos, a fim de limitar o aquecimento apenas à região superficial. Para obter camadas endurecidas com espessura de aproximadamente 0,25 mm, utiliza-se correntes de alta frequência, variando de 100 KHz a 1 MHz, juntamente com uma alta densidade de potência e um tempo reduzido. Por outro lado, camadas mais espessas, com 12 mm ou mais, são alcançadas por meio de correntes de baixa frequência, entre 3 e 25 kHz, e períodos mais longos. (Chiaverini, 2008).

Ainda segundo, Chiaverini (2008) profundidade de aquecimento é controlada através das seguintes variáveis:

- Taxa de alimentação do indutor;
- Forma do indutor;
- Distância de alimentação;
- Frequência;
- Tempo de aquecimento.

A Figura 8 mostra uma ilustração das etapas da técnica de indução.

Figura 8: Técnica de aquecimento por indução. (a) aquecimento da peça. (b) resfriamento subsequente.



Fonte: Adaptado de Chiaverini (2008).

2.1.4. Revenimento

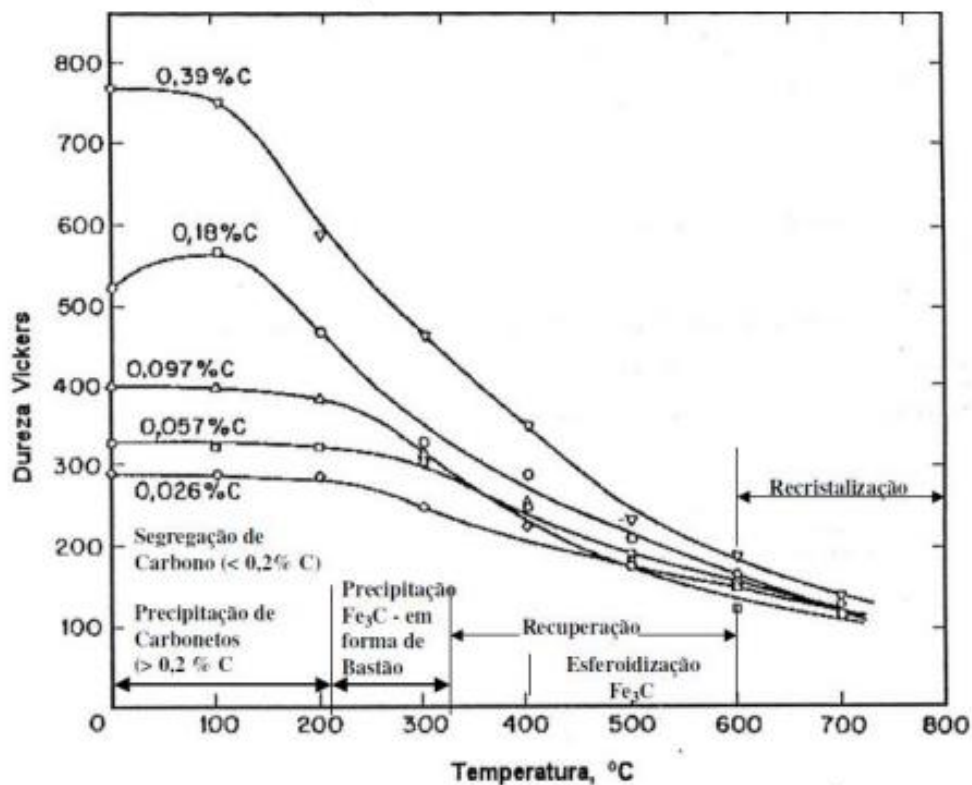
Segundo Hernandez (2009) e Silva (2012), o revenimento é um tipo de tratamento térmico que tem como objetivo, alcançar a melhora das propriedades mecânicas e da tenacidade do material. Basicamente é um processo que visa o aquecimento a temperaturas específicas de aços de microestrutura martensítica. A temperatura de revenido para um aço deve estar abaixo da temperatura de transformação austenítica e acima da faixa de transformação martensítica. Essas faixas variam dependendo da porcentagem de carbono no aço, mas geralmente, faixas de temperatura entre 200°C e 600°C são comuns para o processo de Revenimento. Após o tratamento, o aço alcança uma forma dúctil. O revenimento está ligado a segregação de carbono e precipitação de carbonetos metaestáveis, estes são compostos de carbono que se formam durante o revenimento, são menos estáveis em temperaturas de revenimento e podem sofrer precipitação e mudanças na composição química. Eles afetam as propriedades mecânicas, contribuindo para o aumento da dureza e resistência do material. Além destes fatores, ocorre também as reações de difusão do soluto na matriz que ocasionam a decomposição da austenita retida e a recuperação da recristalização na estrutura martensítica.

Costuma-se dividir o revenimento em quatro estágios. O primeiro estágio consiste na precipitação de carbonetos metaestáveis de transição, estes compostos são menos estáveis termicamente. Esses carbonetos são caracterizados por sua instabilidade e tendência a se decompor durante o processo de revenido, resultando no relaxamento das tensões internas residuais. O segundo e terceiro estágios envolvem a decomposição da austenita retida em ferrita e cementita. Em aços ligados, quando o revenimento é realizado a temperaturas mais elevadas, há o fenômeno da dureza secundária, que se costuma chamar de quarto estágio. A segregação de carbono e a formação de aglomerados (“clusters”) de carbono (processo chamado de envelhecimento) podem ocorrer antes do primeiro estágio de revenido (Parker, 1977; Silva, 2012).

2.1.4.1. Influência do revenimento na dureza e tenacidade

De acordo com Wang (2004), Novikov (1994), Reed Hill (1982), Krauss (1984) e Silva (2012), as mudanças microestruturais que se desenvolvem no decorrer do revenimento interferem diretamente nas propriedades mecânicas do material. Isso se deve em função do tempo e temperatura de revenimento. A Figura 9 demonstra a variação da dureza em função da temperatura de revenimento para martensita em ligas de ferro carbono e as reações subsequentes ao processo.

Figura 9: Variação da dureza no revenimento da martensita em ligas de Fe-C.



Fonte: Chiaverini (2008).

Segundo Wang (2004), Reed Hill (1982) e Silva (2012), existe um progressivo amolecimento à medida que se aumenta a temperatura na faixa de 200-700 °C. Para temperaturas inferiores a 200 °C, a diminuição da dureza não é significativa, sendo possível até mesmo ocasionar o aumento da dureza por causa da precipitação de carbonetos metaestáveis dispersos sobre a matriz.

Para Reed Hill (1982), Marder (1984) e Silva (2012), ocorre-se uma queda brusca da dureza no intervalo de temperatura de 280-400 °C, em razão da precipitação e aumento da cementita, que está relacionada a diminuição do teor de carbono de solução sólida. Esse aumento reduz a quantidade de precipitados na matriz ferrítica, diminui as barreiras que impedem a movimentação das discordâncias e aumenta a ductibilidade e tenacidade do material.

Para Marder (1984) e Silva (2012) quanto maior a temperatura de revenimento, menor será a resistência e dureza do material, e ocorrerá o ganho na ductilidade e tenacidade do aço.

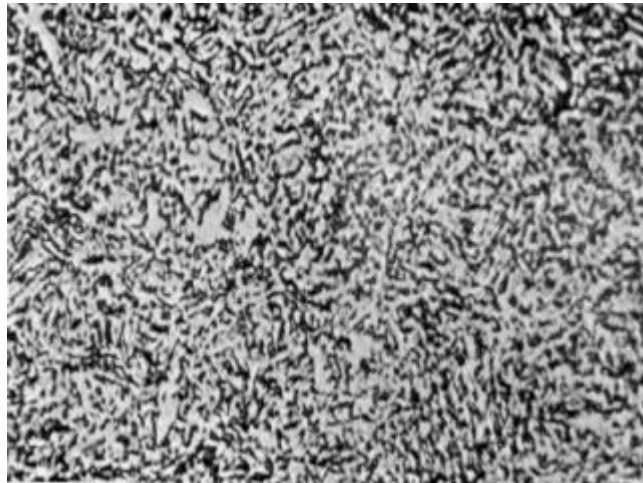
Segundo Chiaverini (2008) e Silva (2012), o primeiro estágio do revenimento está situado no intervalo entre 100°C a 250°C, em que é desenvolvida a precipitação de carboneto de ferro de reticulado hexagonal com diminuição na dureza de até 60 Rockwell C.

Chiaverini (2008) e Silva (2012) citam que o segundo estágio do revenimento é ocorrido na faixa entre 200°C a 300°C, sendo que a dureza continua a cair. Já para aços de médio ou alto teor de carbono que possam deter de alguma austenita retida no processo de têmpera, há a possibilidade de transformação da austenita para bainita.

Conforme Chiaverini (2008) e Silva (2012), o terceiro estágio ocorre entre 250°C e 350°C. Neste estágio é desenvolvido um outro tipo de carboneto, principalmente em aços de elevado teor de carbono. Através de microscópio já é possível se observar a formação de uma massa escura, denominada de troostita. A dureza alcança valores aproximados a 50 Rockwell C.

De acordo com Chiaverini (2008) e Silva (2012), na faixa de 400°C a 600°C, ocorre-se a transformação de carbonetos precipitados em uma forma esferoidal sob um fundo de ferrita fina. A dureza decresce para valores próximos a 25 Rockwell C. A estrutura é conhecida como sorbítica. A figura 10 ilustra o aspecto micrográfico da estrutura sorbítica.

Figura 10: Aspecto micrográfico de um aço temperado e revenido. Estrutura: Sorbíta. Ataque reativo de nital. Ampliação: 1.000 vezes.

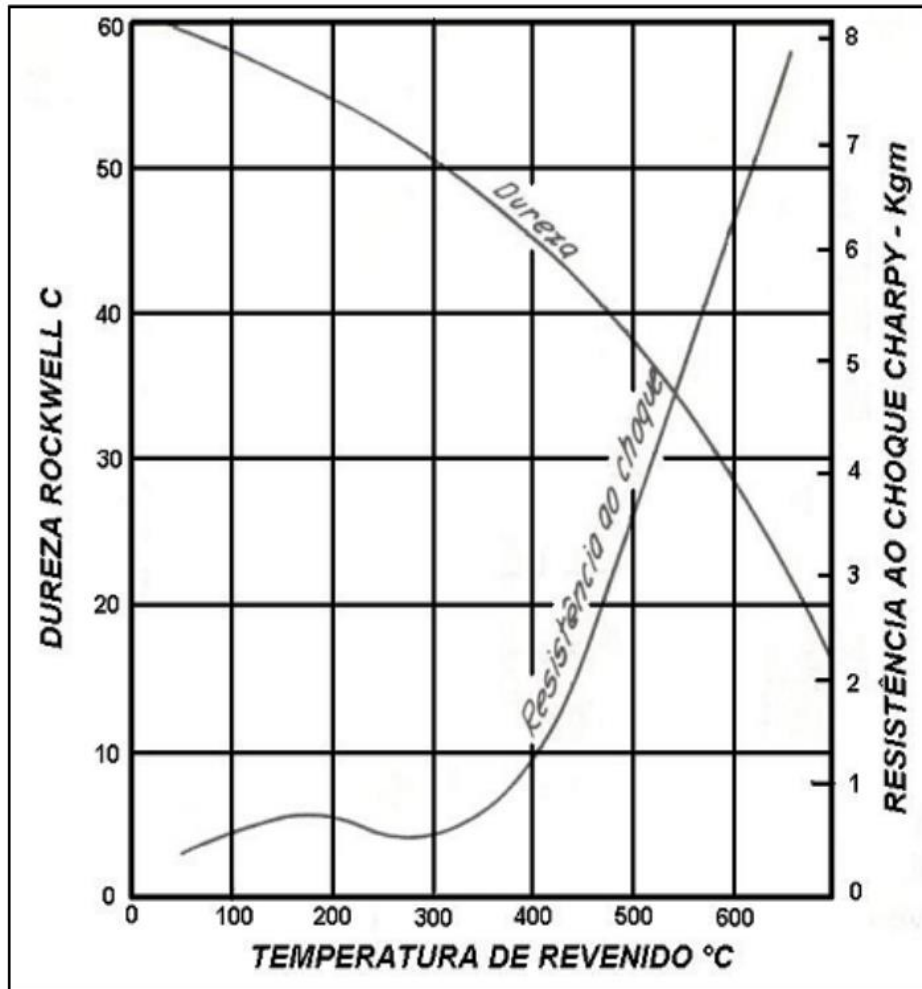


Fonte: Chiaverini (2008).

Já para as temperaturas de 600°C a 700°C desenvolve-se a recristalização e o crescimento do grão. A cementita obtém formato nitidamente esferoidal sob um fundo de ferrita. Essa estrutura é denominada de esferoidita e está relacionada ao tratamento de coalescimento. É muito tenaz e mole e sua dureza varia entre 5 e 20 Rockwell C.

A Figura 11 mostra a queda da dureza e aumento da tenacidade para um aço 1045 de acordo com o crescimento da temperatura (Chiaverini, 2008; Silva, 2012).

Figura 11: Curva de dureza em função da temperatura do aço 145.



Fonte: Chiaverini (1988).

Citado por Ribeiro (2006) e Silva (2012), a dureza de um material é diretamente influenciada pela velocidade de resfriamento e pela temperatura máxima em que ocorre a transformação da austenita. Para garantir boas propriedades mecânicas após a têmpera, é importante aquecer o material até uma temperatura específica em que ocorra a formação de austenita de granulação fina. Portanto, a temperatura prévia à têmpera deve ser ligeiramente superior à temperatura de transformação da austenita.

Ainda segundo os autores, a fragilização por revenido é um fenômeno caracterizado pela perda de tenacidade em temperaturas entre 375°C e 575°C, especialmente em aços-liga de baixa quantidade de ligas. Esse fenômeno ocorre de maneira mais acentuada entre 450°C e 475°C.

Aços carbono comuns, que contêm menos de 0,3% de manganês, não apresentam essa fragilização. No entanto, aços com quantidades consideráveis de manganês, níquel, cromo e impurezas como antimônio, fósforo, estanho ou arsênio são suscetíveis a esse efeito. A presença desses elementos de liga e impurezas desloca a faixa de transição entre ductilidade e fragilidade para temperaturas mais altas. Além disso, foi constatado que as trincas nesses materiais fragilizados se propagam principalmente nas interfaces entre os grãos. É importante ressaltar que os elementos de liga e impurezas tendem a se concentrar nessas regiões.

2.2. Aço SAE 1045

Descrito por Luz (2017), o aço SAE 1045 é um material de médio teor de carbono, média temperabilidade e de boa tenacidade. Caso ele seja beneficiado, pode apresentar também alta resistência mecânica e boa resistência a fadiga. Muito utilizado na indústria, principalmente para construção mecânica, como fabricação de eixos, hastes, barras, engrenagens, componentes estruturais etc. A Figura 12 ilustra uma das aplicações, e as Tabelas 1 e 2 mostram respectivamente a composição química comum e propriedades mecânicas.

Figura 12: Engrenagens fabricadas com aço SAE 1045



Fonte: AN Aços Nobres. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/tipos-de-engrenagens-acos-tabela/> Acesso em: 2023.

Tabela 1: Composição química aço SAE 1045.

Elemento	Teor (%)
Carbono	0,42-0,50
Ferro	98,51-98,98
Manganês	0,60-0,90
Fósforo	<0,040
Enxofre	<0,050

Fonte: Site MatWeb (www.matweb.com), 2023.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço SAE 1045.

Propriedade	Valor
Dureza Brinell	179
Dureza Knoop	200
Dureza Rockwell B	88
Dureza Vickers	188
Tensão de Ruptura (MPa)	625
Resistência a tração (MPa)	530
Alongamento (%)	12
Redução da área (%)	35
Módulo de Elasticidade (GPa)	206
Coeficiente de Poisson	0,29

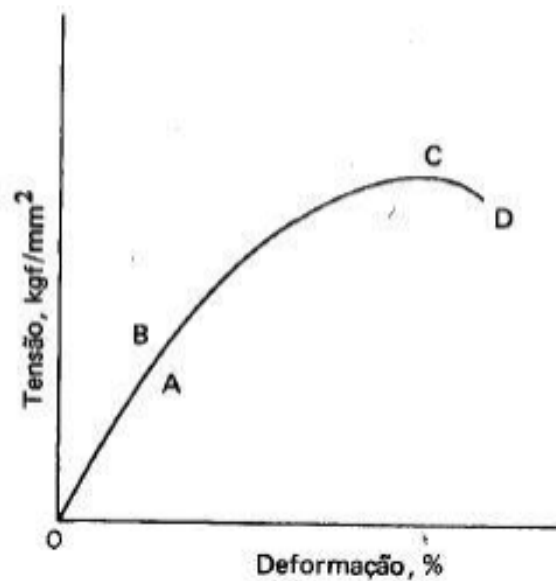
Fonte: Site MatWeb (www.matweb.com), 2023.

2.3. Ensaio de Tração

Segundo Souza (1982) e Anselmo (2017), o ensaio de tração detém de grande representatividade para as análises de comportamento dos materiais, devido a facilidade de execução. Chiaverini (1986) cita que a conexão entre a tensão exercida (Quantidade de carga distribuída sobre a superfície do material em teste) e a consequente deformação pode ser compreendida de maneira mais clara através do gráfico que representa a relação entre a tensão e a deformação. Nesse gráfico, a tensão é representada no eixo vertical e a deformação no eixo horizontal.

Na Figura 13 é visto um exemplo de gráfico de tensão vs deformação. Nele percebe-se que o material tem comportamento elástico até o ponto B. De B para D existe o estágio plástico, já que a partir de B, aumentando as cargas as deformações são permanentes. Seguindo a força, a tensão máxima que o material suporta é o ponto C, que tem o nome de Limite de Resistência a tração. (Chiaverini, 1986; Anselmo, 2017).

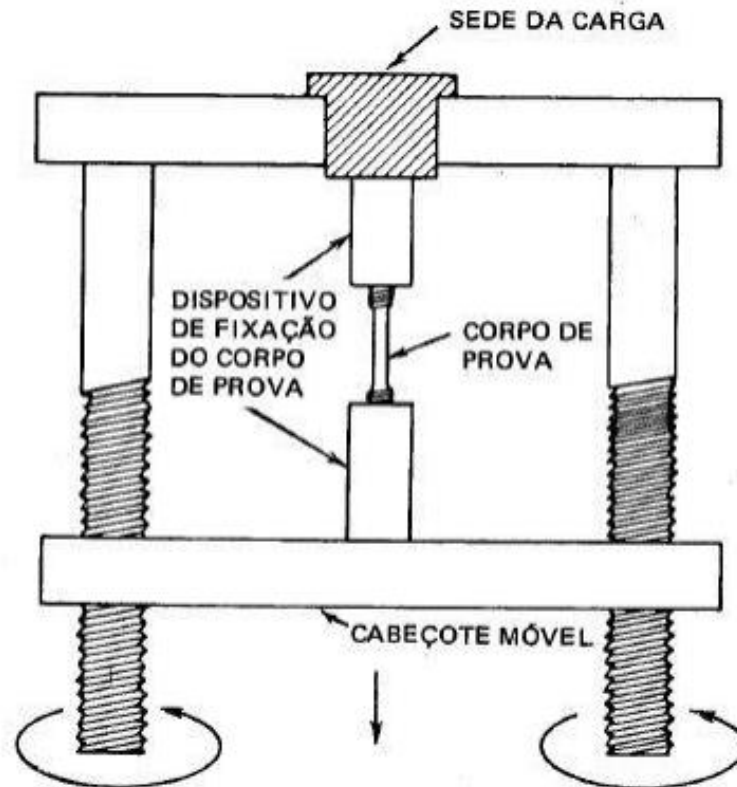
Figura 13: Diagrama Tensão x Deformação.



Fonte: CHIAVERINI, 1986.

Segundo Souza (1982) e Anselmo (2017), a precisão de um ensaio de tração está ligada à precisão dos aparelhos de medição, sendo que com pequenas deformações é possível alcançar grandes precisões, devido à dificuldade de leitura dos valores numéricos ocasionado pela mudança da deformação em função da tensão aplicada. Outras variáveis também podem influenciar de forma prejudicial, como o alinhamento do corpo de prova ou esforços assimétricos que determinam leituras falsas. A deformação tem característica não uniforme quando é alcançada a carga máxima suportada pelo material. Nesse momento é possível visualizar o fenômeno de estrição no material, sendo que a ruptura do material é dada sempre na região de formação da estrição. A Figura 14 mostra um exemplo de máquina universal de ensaio de tração.

Figura 14: Máquina de tração.



Fonte: Chiaverini (1986).

A capacidade de resistência ao estiramento, também conhecida como máxima tração, representa a carga máxima suportada pelo material por unidade de área. É o valor mais comumente observado nos testes. Por ser uma característica facilmente reproduzível e mensurável, ela desempenha um papel importante na determinação das especificações de qualidade de um produto. As correlações estabelecidas entre os valores de resistência ao estiramento e outras propriedades, como dureza e resistência à fadiga, são geralmente valiosas, especialmente para materiais frágeis, sendo a resistência ao estiramento um critério crucial em projetos (Dieter, 1981; Anselmo, 2017).

2.3.1. Metalografia

A metalografia consiste no estudo da constituição, estrutura e textura dos metais. Dessa maneira admite correlação com outras propriedades como, a mecânica, física e química. (Coutinho, 1979; Braga, 2015).

2.3.1.1. Análises Metalográficas

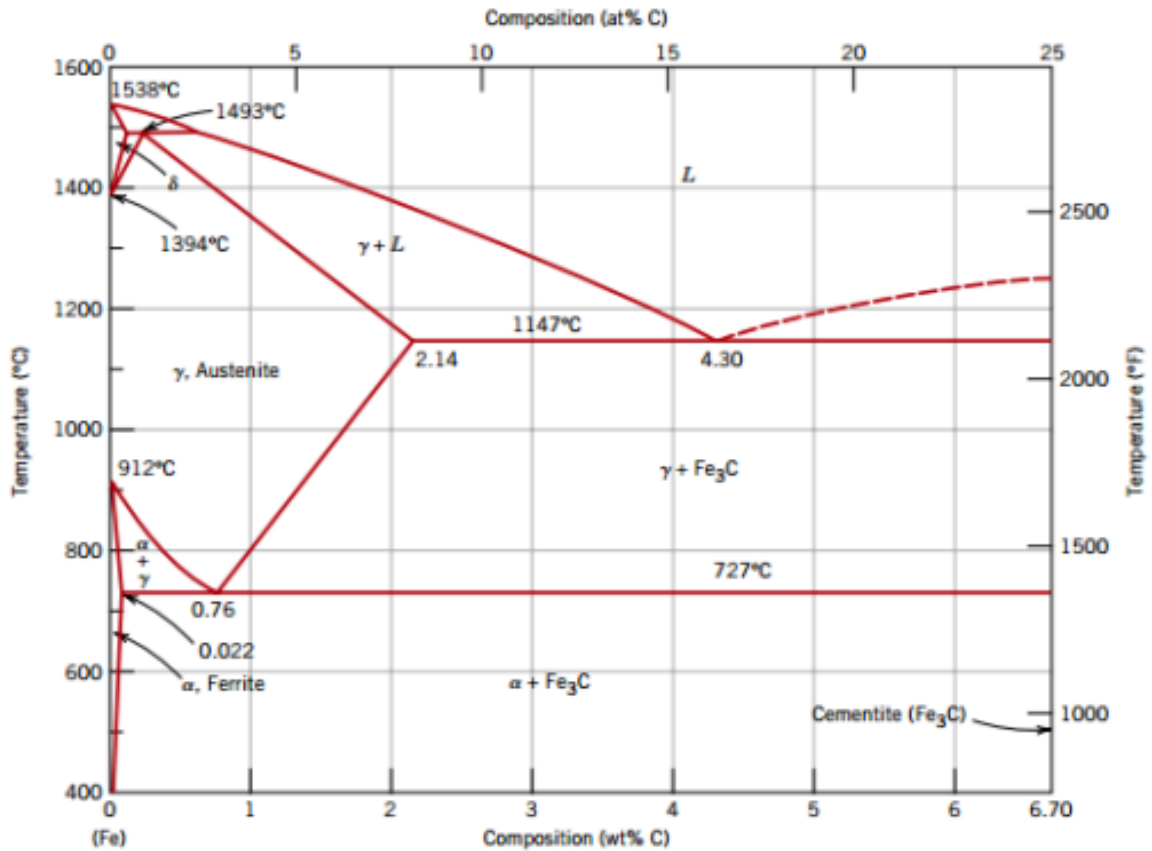
Segundo Colpaert (2008) e Braga (2015), as técnicas analíticas para observação das seções bidimensionais das estruturas dos materiais que tenham características tridimensionais devem ser realizadas de maneira cuidadosa e criteriosa. Os estudos dessas técnicas se iniciam pela formação do grão durante o processo de solidificação, no qual os grãos serão estudados a partir de sua orientação cristalográfica de uma região contínua. É conhecida como contorno de grão a região de transição entre os grãos.

De acordo com Coutinho (1979) e Braga (2015), a macrografia é obtida através da avaliação do aspecto de uma peça/amostra. Sua preparação deve garantir que a superfície esteja livre de imperfeições, como arranhões, irregularidades ou contaminações, que possam interferir na análise macrográfica de maneira a deixar a seção plana, adequadamente polida. O estudo pode ser realizado através do olho nu, ou através de microscópios para ampliação máxima da seção. Com isso, é possível observar o tamanho e forma dos contornos de grão. Através destas análises pode ser obtido diversos aspectos do material, como por exemplo: Fraturas, desgastes, e outras falhas.

2.3.1.2. Transformação de fases

Segundo Braga (2015), devido as várias mudanças que podem ocorrer dentro de um mesmo sistema, é realizado o estudo das transformações de fase. Em uma mesma liga podem existir várias fases. A fase é conhecida como parte do sistema onde suas propriedades são homogêneas e fisicamente distintas das outras fases. O diagrama de fases pode ser representado através de um gráfico que mostra as condições de equilíbrio entre as fases. Existem algumas características generalistas para os diagramas de fase, como as linhas de equilíbrio, que referenciam onde as fases mudam, os pontos triplos que mostram onde as linhas de equilíbrio se encontram e podem demonstrar onde as fases podem coexistir. A Figura 15 mostra o diagrama de fase ferro-cementita.

Figura 15: Diagrama de Fases – Ferro-Cementita.



Fonte: Callister e Rethwisch (2012).

No diagrama acima, observa-se o eixo horizontal que representa a porcentagem de carbono na liga, variando de 0% a aproximadamente 6,7%. Já o eixo vertical representa a temperatura em graus Celsius. O diagrama é dividido em diferentes regiões cada uma corresponde a uma fase. A fase predominante é a ferrita, que é uma solução sólida de carbono em ferro alfa. A ferrita é uma fase macia e dúctil, com baixa resistência mecânica. Ela existe em temperaturas relativamente baixas e de baixas concentrações de carbono, entre 400-850°C e 0-0,022% de carbono (Callister, 2012).

A cementita, também conhecida como carboneto de ferro, é uma fase rica em carbono e altamente dura. Ela é representada por uma linha vertical no diagrama com solubilidade de aproximadamente 6,7% de carbono. Outra região importante do diagrama é a região da austenita, que ocorre em temperaturas entre 770-1493°C, com solubilidade máxima de carbono de 2,14%, essa fase possui alta resistência mecânica (Callister, 2012).

Além das fases de transformação também se observa o ponto de transformação simultânea de austenita em ferrita e cementita, também conhecida como perlita. Este ponto é chamado de ponto eutetóide, sua solubilidade de carbono é de aproximadamente 0,76%. Abaixo do ponto eutetóide é encontrado a região de transformação hipoeutetóide, nesta região é encontrado os aços com teor de carbono abaixo do ponto eutetóide. Na transformação hipoeutetóide, a microestrutura consiste principalmente de ferrita, com inclusões de cementita distribuídas na matriz ferrítica. Já acima do ponto eutetóide é encontrado a região hipereutetóide, nesta região é encontrado os aços com teor de carbono acima do ponto eutetóide, sua microestrutura consiste principalmente em cementita, com inclusões de ferrita na matriz de cementita (Callister, 2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Nesta seção do trabalho, será discorrido sobre o aço 1045 utilizado no estudo. O aço 1045 é um aço de médio teor de carbono, amplamente empregado na indústria devido à sua combinação favorável de resistência mecânica e usinabilidade. No presente estudo, foi utilizada uma barra redonda laminada a frio, que foi conformada de acordo com a norma DIN 50125:2009-07.

O tratamento térmico realizado envolveu a aplicação de dois procedimentos distintos nas amostras. Duas amostras permaneceram no estado recebido, ou seja, não foram submetidas a nenhum tratamento adicional além da usinagem inicial. Duas outras amostras passaram pelo processo de têmpera, no qual foram aquecidas a uma temperatura específica e resfriadas rapidamente em um meio apropriado para aumentar sua dureza. As duas amostras restantes foram submetidas à têmpera seguida de revenimento. Após o resfriamento rápido, foi feita a etapa de revenimento, as amostras foram reaquecidas a uma temperatura inferior e mantidas por um período determinado, seguido de resfriamento lento, visando ao aumento da tenacidade e à redução de tensões internas.

Posteriormente, todas as amostras foram submetidas a ensaios de tração, que visam avaliar propriedades mecânicas como resistência à tração, limite de escoamento e alongamento.

3.2. Métodos

Nesta seção foram descritos os métodos utilizados para a preparação das amostras, para os tratamentos térmicos aplicados, assim como para os ensaios de tração realizados. Os seguintes materiais e equipamentos foram utilizados no trabalho.

- *Corpos de prova* em aço SAE 1045 usinados;
- Alicates Tenaz Pegador 500mm e Luvas de Proteção
- Forno Mufla 6,7L – 100 a 1200°C
- Máquina de ensaio de tração

A seguir é visto um conjunto de imagens na Figura 16 com os materiais e equipamentos utilizados.

Figura 16: Materiais e equipamentos utilizados no trabalho. a) corpos de prova; b) máquina de ensaio de tração; c) alicate tenaz e luvas de proteção; d) forno mufla.



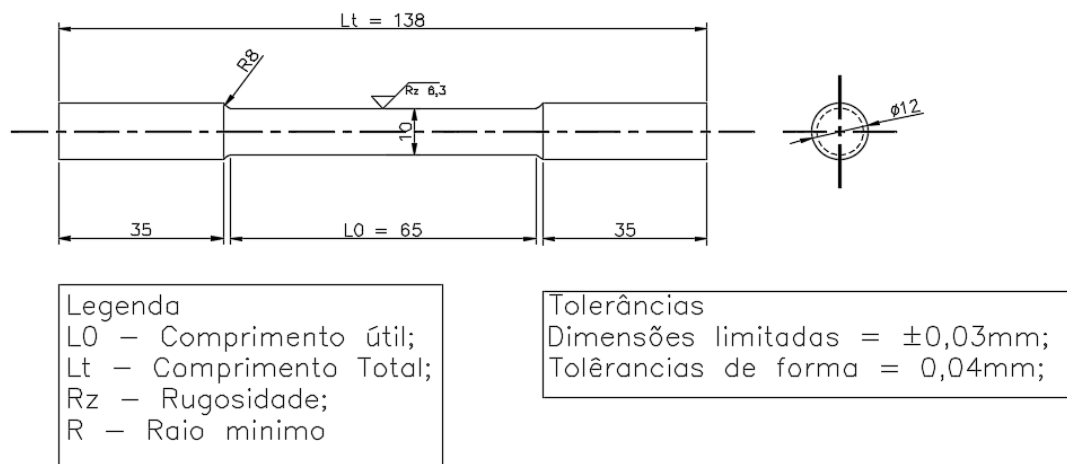
Fonte: Do Autor. 2023.

3.2.1. Preparação dos Corpos de prova

A preparação dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma DIN 50125 para garantir a padronização e comparação dos resultados dos ensaios de tração. Foram selecionadas seis amostras de aço 1045 com dimensões adequadas para os ensaios.

Os corpos de prova foram usinados seguindo as especificações da norma DIN 50125, considerando as dimensões e geometria padronizadas, conforme mostra a Figura 17. Cuidados foram tomados para garantir a precisão e qualidade das peças usinadas, a fim de minimizar qualquer influência externa nos resultados dos ensaios. É importante destacar que a usinagem foi realizada de acordo com os parâmetros definidos pela norma DIN 50125, com atenção especial para a rugosidade superficial.

Figura 17: Dimensões da amostra para o ensaio Forma A.



Fonte: Norma DIN 50125:2009-07.

3.2.2. Tratamento Térmico

Os tratamentos foram realizados no Laboratório da mecânica do IFMG Campus Betim. As peças foram tratadas termicamente em um forno mufla com as seguintes especificações:

- Fabricante: IND. COM. FORNOS MAGNUS LTDA;
- Potência máxima: 3,7 kW;
- Tensão/Corrente: 220 V/16 A;
- Temperatura de aquecimento máxima: 1200 °C;
- Dimensões internas: 30x16x16 cm.

Essas configurações foram determinantes para o aquecimento controlado das amostras durante os processos de têmpera e revenimento.

Para garantir a segurança durante a manipulação das peças e o manuseio do forno, foram utilizadas luvas de proteção, que são equipamentos de segurança padrão para evitar possíveis queimaduras. Além disso, um alicate tenaz pegador de 500mm foi empregado para manusear as amostras com maior precisão e segurança durante os procedimentos.

Dentre as amostras, duas foram submetidas apenas ao tratamento de têmpera, outras duas foram submetidas ao tratamento de têmpera e revenimento, e as duas restantes foram mantidas apenas no estado recebido, sem nenhum tratamento térmico aplicado.

No processo de têmpera, as amostras foram aquecidas até atingirem uma temperatura de patamar de 850°C, permanecendo nessa temperatura por 45 minutos, seguido por um resfriamento rápido utilizando água. Já no processo de revenimento, as amostras foram aquecidas até atingirem uma temperatura de patamar de 550°C, mantendo-se nessa temperatura por 45 minutos, seguido por resfriamento ao ar livre. Essa abordagem permitiu a comparação dos resultados entre as peças tratadas termicamente e as peças no estado recebido.

Ao longo do trabalho, as peças serão identificadas conforme a seguinte classificação:

Peças submetidas apenas ao tratamento de têmpera: T1 e T2.

Peças submetidas ao tratamento de têmpera e revenimento: R1 e R2.

Peças mantidas no estado recebido: NR1 e NR2.

3.2.2.1. Têmpera

Nesta seção, será descrito o método utilizado para realizar o tratamento térmico de têmpera nos corpos de prova, de acordo com os padrões e normas técnicas sugeridas.

- **Preparação das Amostras:** Antes do tratamento térmico, as amostras foram cuidadosamente limpas para remover qualquer impureza ou contaminação que pudesse afetar os resultados do experimento.
- **Etapa de Aquecimento:** A temperatura de aquecimento escolhida foi de 850 °C, baseada em estudos anteriores e recomendações técnicas para o aço 1045. A Figura 18 mostra as amostras dentro do forno.

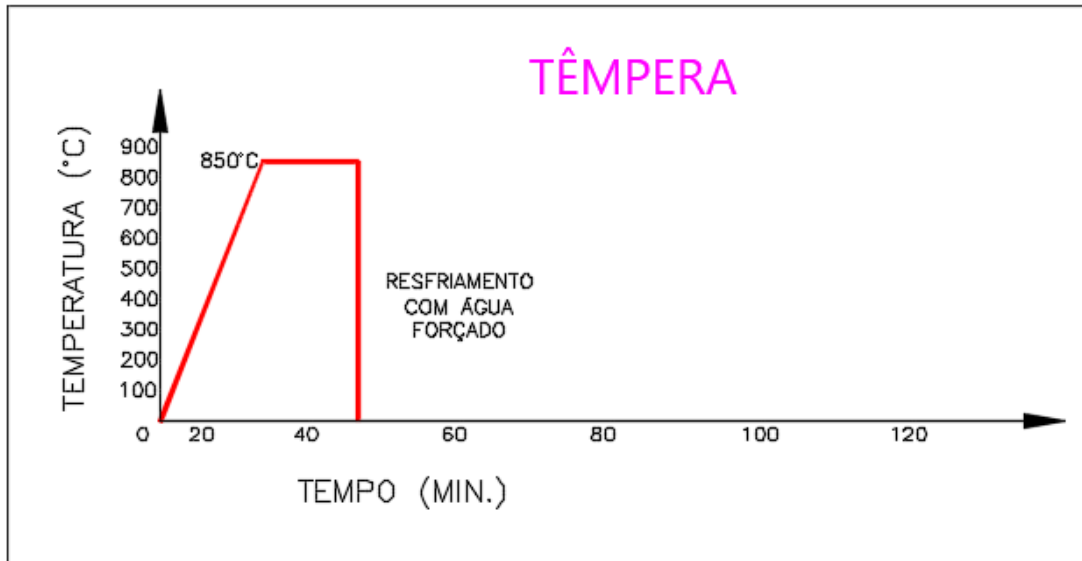
Figura 18: Peças em aquecimento (Têmpera).



Fonte: Do Autor.

- Para o tempo de aquecimento, as amostras foram mantidas a uma temperatura de 850 °C por um período de 45 minutos. Isso permitiu que o aço atingisse uma temperatura homogênea e garantisse a transformação adequada da microestrutura. O Gráfico 1 mostra a rampa de aquecimento da têmpera.

Gráfico 1: Rampa de aquecimento (Têmpera)



Fonte: Do Autor.

- Etapa de Resfriamento: A técnica de resfriamento escolhida foi a têmpera em água, utilizando água para garantir uma taxa de resfriamento rápida e uniforme. Após o tempo de aquecimento, as amostras foram imediatamente retiradas do forno e imersas no banho de água, garantindo que toda a superfície da amostra estivesse em contato com o líquido de resfriamento, resfriando até uma temperatura ambiente aproximada de 20°C. Na Figura 19 é vista a amostra após resfriamento.

Figura 19: Corpo de prova após resfriamento (Têmpera).



Fonte: Do Autor.

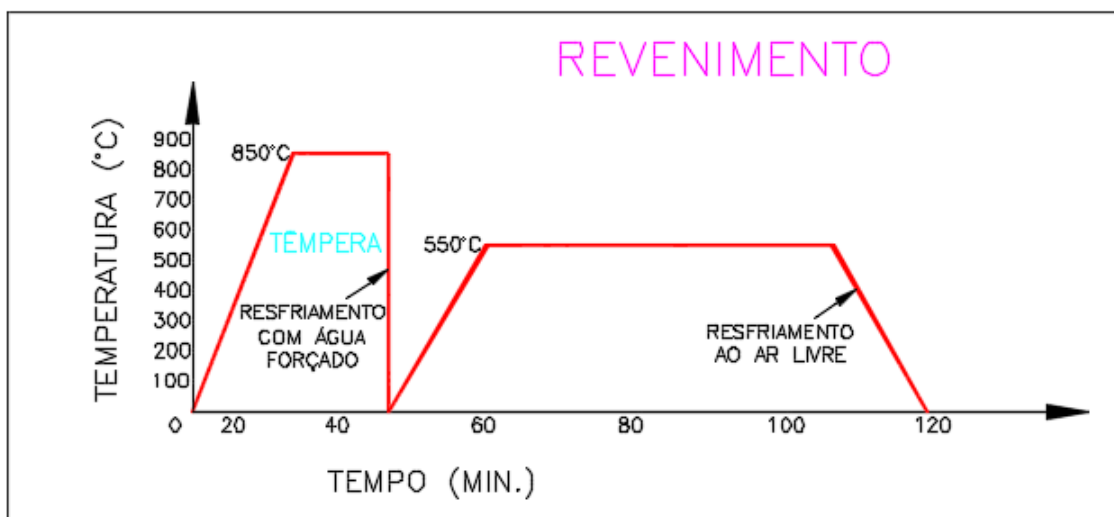
- Quantidade de Amostras: No presente estudo, foram temperadas quatro das seis peças usinadas, com o objetivo de obter resultados representativos e avaliar a influência do tratamento térmico na microestrutura e propriedades mecânicas do aço 1045.

3.2.2.2. Revenimento

Nesta seção, será descrito o método utilizado para realizar o tratamento térmico de revenimento nas amostras de aço 1045, com base nas duas amostras que foram previamente temperadas.

- Preparação das Amostras: Após o tratamento de têmpera, foram selecionados dois corpos de prova para serem submetidos ao tratamento de revenimento. As amostras selecionadas receberam os mesmos cuidados de limpeza mencionados na etapa anterior.
- Etapa de Aquecimento: Para o tratamento de revenimento a temperatura de aquecimento escolhida foi de 550 °C. Essa temperatura foi selecionada com base em estudos anteriores e recomendações técnicas para este material. As amostras foram mantidas a uma temperatura de 550 °C por um período de 45 minutos, garantindo que a temperatura fosse uniformemente alcançada em toda a amostra, seguindo o mesmo tempo utilizado na etapa de têmpera. Na Figura 20 são vistas as amostras durante aquecimento e o Gráfico 2 mostra a rampa de aquecimento.

Gráfico 2: Rampa de aquecimento (Revenimento)



Fonte: Do Autor.

Figura 20: Corpo de prova durante aquecimento (Revenimento)



Fonte: Do Autor.

- Etapa de Resfriamento: Para o tratamento de revenimento, o resfriamento foi realizado ao ar livre, permitindo que as amostras resfriassem naturalmente até a temperatura ambiente de aproximadamente 20°C. Nenhuma técnica de resfriamento adicional foi aplicada. As amostras durante o resfriamento são vistas na Figura 21.

Figura 21: Corpos de prova durante resfriamento (Revenimento)



Fonte: Do Autor.

3.2.3. Ensaio de tração

Nesta seção, será descrito o método utilizado para realizar o ensaio de tração nas amostras de aço 1045 após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Assim como nos tratamentos térmicos, os ensaios de tração foram realizados no Laboratório da Mecânica do IFMG Campus Betim. O ensaio foi conduzido utilizando a máquina de tração EMIC DL-30000, com capacidade máxima de 300 kN. Essa máquina possui recursos adequados para aplicar a carga axial às amostras e registrar as alterações de força e deformação durante o ensaio. A figura 22 mostra a máquina de tração utilizada para os estudos.

Figura 22: Máquina de tração EMIC DL-30000 (IFMG)



Fonte: Do Autor. 2023.

Para garantir uma fixação adequada das amostras durante os ensaios de tração, foram selecionadas castanhas de fixação de formato cunha. Essa escolha visa proporcionar uma melhor aderência entre as amostras e as garras da máquina de tração, minimizando o risco de

deslizamento durante o ensaio. As castanhas de fixação foram devidamente posicionadas nas extremidades das amostras para assegurar uma distribuição uniforme da força aplicada. A sequência dos ensaios de tração foi definida como NR1, NR2, T1, T2, R1 e R2.

3.2.3.1. Pré-Carga e Medição do Comprimento útil das Amostras

Antes de iniciar os ensaios, cada amostra foi submetida a uma pré-carga inicial de aproximadamente 150 kg. Essa pré-carga teve como objetivo verificar a adequação da fixação das amostras, garantindo a estabilidade durante o ensaio. Antes de iniciar os ensaios de tração propriamente ditos, o comprimento útil de cada amostra foi medido com o auxílio de um paquímetro. Essa medida do comprimento útil é fundamental para determinar o alongamento da amostra durante o ensaio. A Figura 23 mostra o paquímetro utilizado.

Figura 23: Paquímetro Digimes Universal 0-200mm resolução 0,02mm.



Fonte: Do Autor. 2023.

3.2.3.2. Execução dos Ensaios

Os ensaios de tração foram realizados conforme as especificações da norma de ensaio de tração aplicável. Iniciou-se a sequência de ensaios com as amostras NR1 e NR2, seguindo para T1, T2, R1 e, por último, R2. Durante a realização dos ensaios, a máquina de tração aplicou a carga axial gradualmente, registrando as alterações de força e deformação ao longo do tempo. Os dados foram registrados para posterior análise. Entretanto, a partir dos ensaios de T1, surgiram dificuldades na fixação das amostras. Houve um problema recorrente de escorregamento nas bases superior e inferior, o que levou à interrupção automática do ensaio pela máquina de tração como medida de segurança.

Para solucionar esse problema, foram realizadas diversas tentativas. Inicialmente as extremidades de apoio das garras foram lixadas para aumentar a rugosidade e melhorar a

aderência. No entanto, essas medidas não foram eficazes o suficiente. Posteriormente, foi tentado enrolar arame de cobre para melhorar a área de contato, mas também não se obteve sucesso. As últimas opções consideradas foram a soldagem ou a usinagem das extremidades. No entanto, após uma análise, foi concluído que a melhor opção seria a usinagem. Isso se deve ao fato de que a soldagem apresenta um risco maior de alterar a microestrutura do material, o que poderia influenciar nos resultados finais. Especificamente, o aquecimento da ZTA (Zona Termicamente Afetada) durante o processo de soldagem poderia afetar negativamente a microestrutura.

Apesar dessa avaliação, a opção escolhida foi a soldagem em vez da usinagem. Essa decisão foi motivada pelo prazo restrito para entrega e finalização do trabalho. Mesmo cientes dos riscos envolvidos na soldagem, foi considerado que era necessário priorizar a rapidez no processo para cumprir os prazos estabelecidos.

3.2.3.2.1. Registro do processo

Durante o processo de ensaios de tração, foram feitos registros para documentar as etapas do processo. A seguir, são apresentados os registros que fazem parte deste estudo.

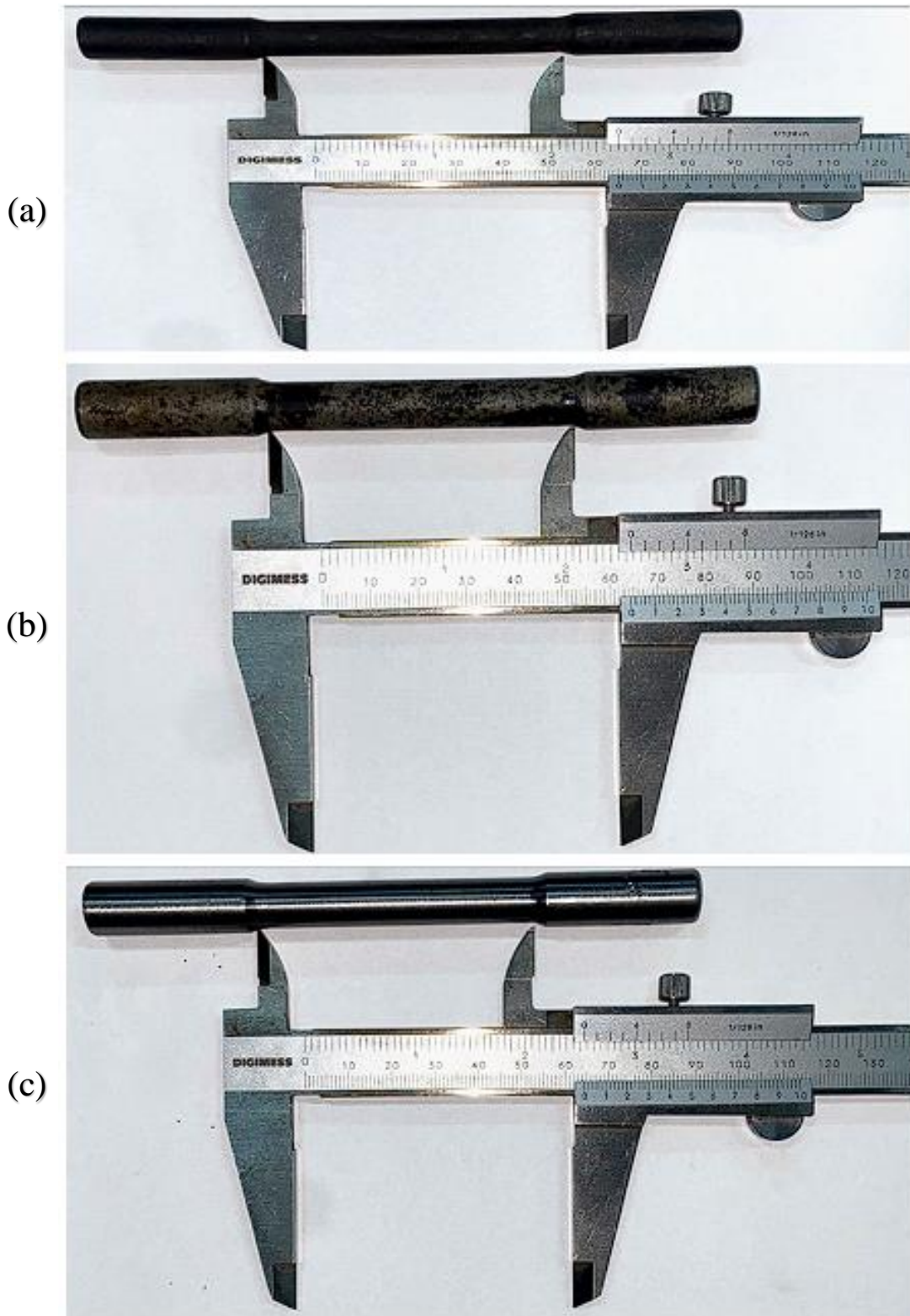
Medição das amostras: A tabela 3 mostra o comprimento útil de cada corpo de prova antes da tração e a Figura 24 ilustra a medição dos corpos de prova NR2, T1 e R1.

Tabela 3: Medições do comprimento útil do aço SAE 1045 temperado.

Corpo de Prova	Comprimento Útil (mm)
NR1	64,22
NR2	64,36
T1	64,40
T2	64,70
R1	64,10
R2	64,52

Fonte: Do Autor. 2023.

Figura 24: Medição dos corpos de prova antes da tração. (a) R1, (b) T1 e (c) NR2.



Fonte: Do Autor. 2023.

A respeito do processo de soldagem das amostras, a solda foi realizada utilizando eletrodo ER6013 de diâmetro de 2,5mm e uma corrente abaixo de 60 Amperes para evitar o aquecimento excessivo das amostras, o que poderia interferir nos resultados dos tratamentos térmicos. No entanto, antes de executar a solda, uma inspeção visual foi realizada nas amostras, e trincas foram identificadas nos corpos de prova. Essas trincas foram causadas pelo tratamento de têmpera e poderiam afetar os resultados dos ensaios de tração.

Após a realização dos cordões de solda, foram feitas novas tentativas para obter a melhor fixação possível das amostras. Apesar dos esforços, não foi possível fixar a última amostra, R2, mesmo após a solda.

Ainda sobre a escolha do eletrodo ER6013, essa escolha baseou-se na soldabilidade desse eletrodo, especialmente em relação a aços de baixa e média resistência, como o aço temperado e revenido.

O eletrodo 6013 possui características que permitem soldar materiais com alta dureza, além de oferecer facilidade de operação e estabilidade de arco durante a soldagem. A sua composição química, incluindo revestimento de fluxo, permite uma boa formação do cordão de solda, proporcionando aderência eficiente entre os corpos de prova e a máquina de ensaio. A utilização dos cordões de solda visou garantir a fixação dos corpos de prova à máquina de ensaio, sem impactar diretamente nos resultados dos ensaios de tração, cujo objetivo é avaliar as propriedades mecânicas do material (LIPPOLD, John C. et al. 2014).

Como forma de minimizar os efeitos da solda, foi feito o cordão o mais afastado possível da zona de interesse de ensaio e foi realizado o resfriamento rápido das áreas soldadas utilizando água, a fim de evitar que a temperatura da zona termicamente afetada pela solda se propagasse pelo comprimento da amostra, alterando a microestrutura do material e comprometendo os resultados dos ensaios.

Portanto, essa adaptação proporcionou uma solução mais rápida para o problema de fixação, assegurando a execução dos ensaios.

Registro das adaptações para fixação dos corpos de prova: A Figura 25 mostra a soldagem realizada nas bases de apoio superior e inferior das amostras.

Figura 25: Adaptações das bases de apoio das amostras utilizando solda. (a) T1, (b) T2, (c) R1 e (d) R2.



Fonte: Do Autor. 2023.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta Seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio dos ensaios de tração realizados nas amostras de aço 1045 com diferentes tratamentos térmicos. Os valores de resistência mecânica, ductibilidade e fragilidade serão comparados entre si, relacionando-os com os tratamentos térmicos aplicados. Além disso, serão feitas comparações com resultados de outros trabalhos com o objetivo de estabelecer uma análise mais abrangente.

Os resultados dos testes de tração foram obtidos por meio da utilização da máquina de ensaios EMIC DL-30000 e estão apresentados na Tabela 4, além do Gráfico 3.

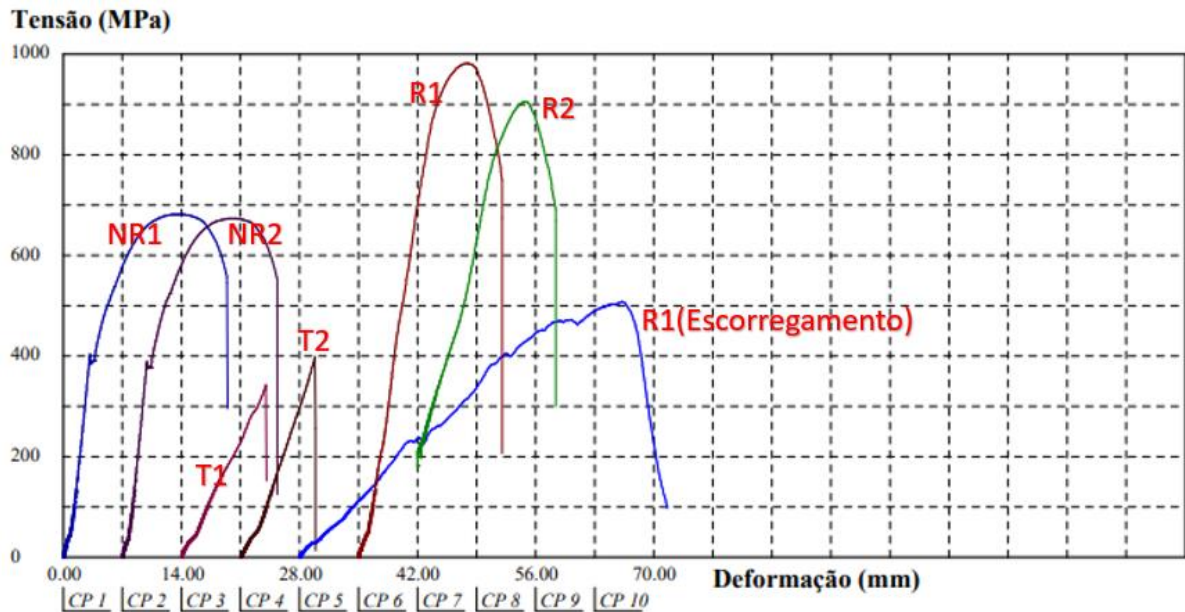
Tabela 4: Resultado dos ensaios de tração dos corpos de prova NR1, NR2, T1, T2, R1 e R2.

Corpo de Prova	Força no Escoamento (kgf)	Força Máxima (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
NR1	3762,61	53593,30	469,81	682,37
NR2	3716,40	52929,35	464,04	673,92
T1	2595,58	26941,89	324,09	343,03
T2	2998,95	31413,18	374,45	399,97
R1	7052,20	77111,69	880,55	981,82
R2*	6513,17*	71188,00	813,77*	906,39

Fonte: Do Autor. 2023.

*O ensaio em R2 foi o que mais apresentou problemas de escorregamento, foi necessário aplicar uma pré-carga acima de 1000 kg para conseguir fixar a amostra, dessa maneira não foi possível iniciar o teste do zero, sendo assim a máquina não calculou os valores para o escoamento. Para determinar os valores aproximados para o escoamento, foi feito a comparação entre os resultados de R1 utilizando interpolação linear.

Gráfico 3: Gráfico de Tensão x Deformação.



Fonte: Do Autor. 2023.

Para o alongamento, os resultados foram obtidos através da Equação 1. A Figura 26 mostra como foram feitas as medições pós ensaios de tração. Os resultados obtidos para o alongamento estão apresentados na Tabela 5.

$$Al = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \times 100 \text{ (Eq.1)}$$

Fonte: Dieter, G. E. (1988). 2023.

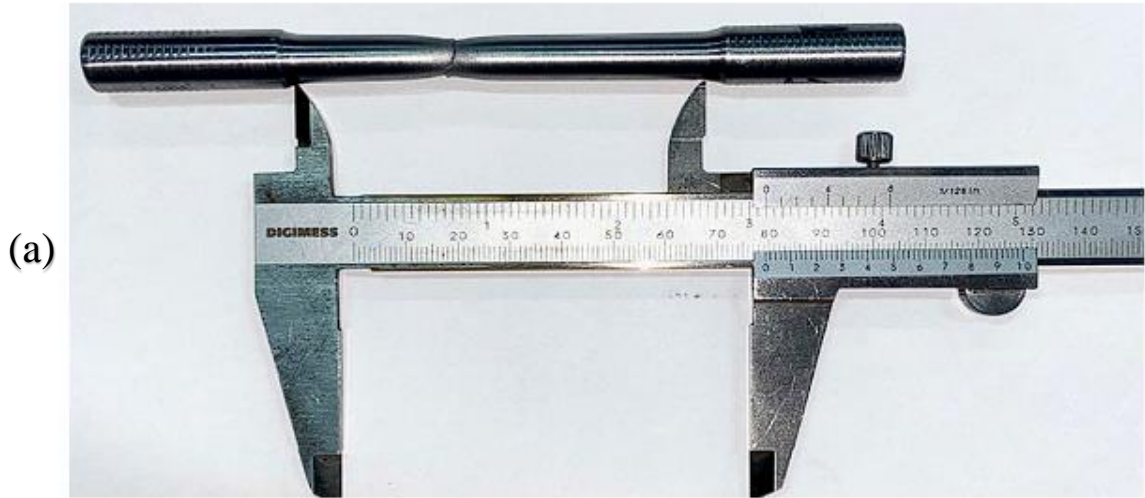
Onde: Lf: comprimento após tração, L0: comprimento inicial antes da tração, Al: alongamento percentual.

Tabela 5: Resultado do alongamento para os corpos de prova NR1, NR2, T1, T2, R1 e R2.

Corpo de Prova	L0 (mm)	Lf (mm)	Lf-L0 (mm)	Al (%)
NR1	64,22	79,26	15,04	23,40
NR2	64,36	79,00	14,64	22,70
T1	64,40	64,72	0,32	0,50
T2	64,70	64,94	0,24	0,40
R1	61,10	73,80	12,70	15,10
R2	64,52	72,50	7,98	12,37

Fonte: Do Autor. 2023.

Figura 26: Medição do Comprimento útil após o ensaio de tração. (a) NR1 e (b) R1.



Fonte: Do Autor. 2023.

A partir do Gráfico 3, foi possível analisar o comportamento mecânico das amostras submetidas aos tratamentos térmicos. Serão consideradas as amostras NR1 e NR2, que não foram submetidas a tratamento térmico, e comparar com as amostras tratadas (T1, T2 e R1 e R2).

Para as amostras NR1 e NR2, que são amostras como recebidas sem tratamento térmico, observa-se um comportamento típico de materiais dúcteis. Conforme a deformação, a tensão também aumenta gradualmente, até atingir a tensão máxima. Esse comportamento é esperado para materiais dúcteis, em que ocorre uma redistribuição das tensões internas do deslizamento e deformação plástica dos grãos.

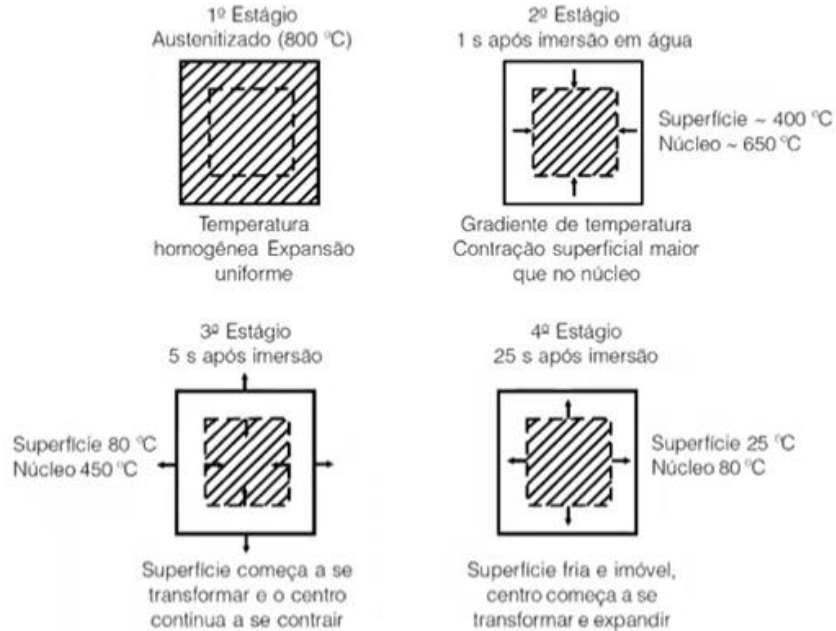
Já para as amostras tratadas termicamente, observa-se resultados distintos. Para as amostras temperadas (T1 e T2), observou-se uma resposta mecânica mais rígida, com uma região elástica bem definida e uma deformação plástica muito limitada. Isso indica que o tratamento de têmpera tornou as amostras mais frágeis e com menor capacidade de deformação plástica antes da ruptura.

Entretanto, durante os ensaios de tração as amostras T1 e T2 romperam antes de atingir os valores de tensão esperados. Vale ressaltar que essas amostras apresentaram trincas visíveis, o que pode ter comprometido sua resistência mecânica. Como consequência os valores de tensão de escoamento e resistência mecânica obtidos foram inferiores aos previstos.

Com isso é necessário considerar que as trincas podem ter enfraquecido significativamente as amostras, resultando em uma menor capacidade de suportar cargas. A análise das trincas presentes antes dos ensaios é de extrema relevância para compreender os motivos de sua ocorrência, bem como os potenciais efeitos decorrentes delas. As trincas que surgiram durante o processo de resfriamento são devidas à rápida taxa de resfriamento, característico da têmpera, e podem ser atribuídas a fatores como tensões geradas pela mudança brusca de temperatura e a presença de microestruturas heterogêneas no material. Essas trincas comprometem integridade estrutural das peças, reduzindo sua resistência mecânica e podendo levar a falhas prematuras e propagação de fraturas. (Rajan et al. 2006)

A figura 27 demonstra como é o surgimento das tensões internas residuais.

Figura 27: Estado de tensão de um material temperado



Fonte: Chiaverini, 2008.

Através da figura 27 pode-se observar que a formação de tensão interna residual está atribuída ao resfriamento não uniforme entre superfície e núcleo do material. O material passa por várias etapas que contribuem para o surgimento dessas tensões.

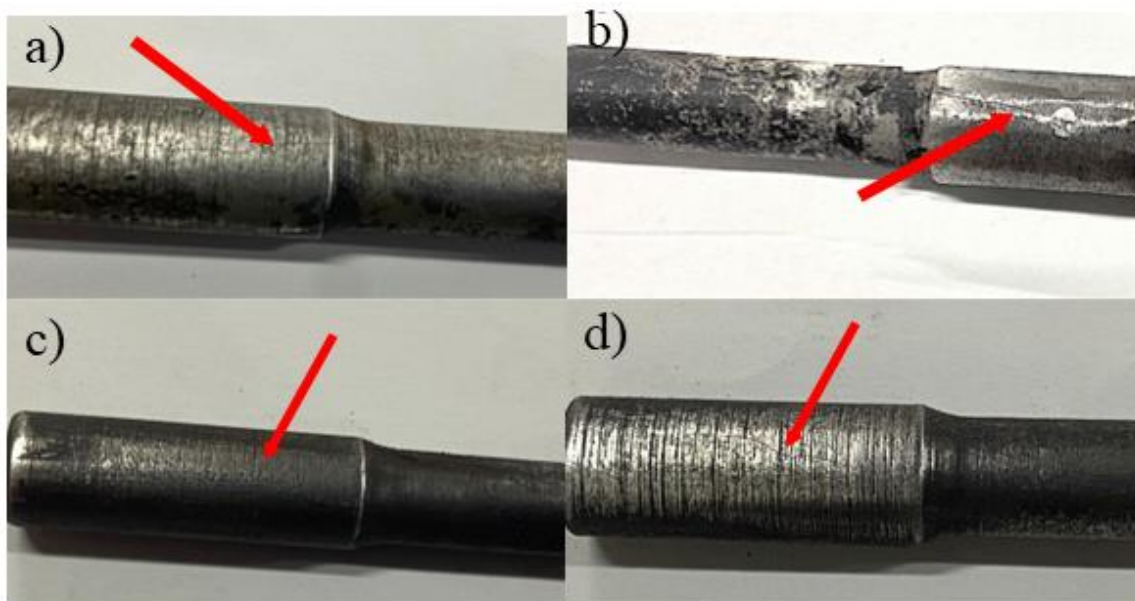
Na etapa 1, o material está completamente austenitizado, o que gera uma expansão uniforme em toda a peça. Nesse estágio, não há diferenças significativas de temperatura e o material se encontra em um estado de equilíbrio térmico. Na etapa 2, o material é imerso em um meio de resfriamento, resultado em uma diferença de temperatura entre a superfície e o núcleo. A superfície atinge uma temperatura mais baixa do que o núcleo, gerando uma força de contração que atua contra o núcleo. Essa contração ocorre devido à redução volumétrica causada pela diminuição da temperatura (Chiaverini, 2008).

Na etapa 3, a superfície começa a se transformar em martensita. Essa transformação microestrutural provoca uma expansão localizada na superfície. Enquanto isso, o núcleo continua resfriando, diminuindo sua temperatura e ocasionando uma força de contração. Por fim, na etapa 4, a superfície do material se transforma completamente em martensita, alcançando um estado estável. Entretanto, o núcleo ainda está passando pelo processo de transformação em martensita, o que resulta em uma força de expansão atuando contra a sua superfície. Essa diferença na taxa de transformação entre superfície e o núcleo causa tensões residuais que se acumulam no material (Chiaverini, 2008).

Ainda sobre o estudo das trincas, é recomendado utilizar técnicas de análise como ensaios não destrutivos, metalografia e microscopia eletrônica de varredura. Explorar estratégias de mitigação das trincas também é relevante, como ajuste dos parâmetros de têmpera e a realização de tratamentos intermediários ou alívio de tensões. Compreender as causas, efeitos e possíveis soluções para as trincas contribui para aprimorar a qualidade e a segurança dos componentes fabricados com aço 1045 na área de tratamentos térmicos.

Registro das trincas: A Figura 27 mostra a detecção das trincas nas amostras temperadas.

Figura 28: Trincas nos corpos de prova temperados e revenidos. a) T1; b) T2; c) R1; d) R2.



Fonte: Do Autor. 2023.

Por outro lado, para as amostras revenidas, observa-se um comportamento superior em relação as amostras sem tratamento e as temperadas. Há uma região elástica definida, seguida por uma região de deformação plástica mais significativa antes da ruptura e de maior resistência. Isso indica que o tratamento de revenimento melhorou a capacidade de deformação plástica das amostras, tornando-as mais resistentes em comparação às amostras temperadas e sem tratamento.

Esse aumento de resistência é devido a modificação microestrutural sofrida pela amostra após revenimento. Segundo Reed Hill. (1982), durante o revenimento é formada martensita revenida presente numa estrutura de ferrita/cementita em aços médio carbono. Essas duas microestruturas são mais resistentes do que a martensita frágil obtida após a têmpera e a fase mista perlita/ferrita das amostras não tratadas. Para Callister (2012), a razão para essa resistência superior é devido a uma atuação mista entre ferrita e cementita. A fase cementita, mais dura, reforça a matriz de ferrita ao longo dos contornos de grão, atuando como barreiras para o movimento das discordâncias durante a deformação plástica. Já a ferrita, contribui com a ductilidade e tenacidade.

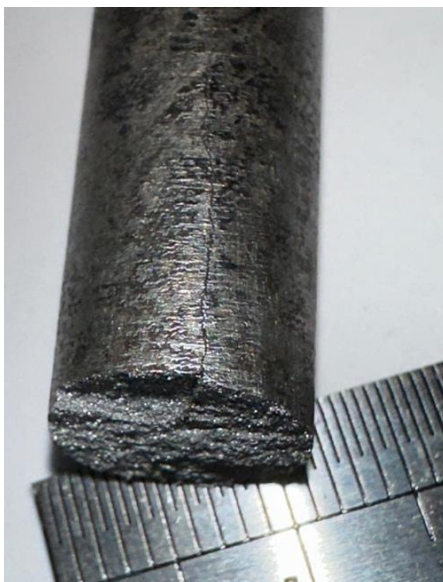
Para além das razões relacionadas a microestrutura, outros fatores discutidos a seguir também justificam a diferença dos resultados entre as amostras não-tratadas, temperadas e revenidas.

Conforme descrito por Colpert (1988), a resistência mecânica de um material é uma medida de sua capacidade de suportar cargas sem sobre deformações plásticas ou fratura. Neste estudo foram considerados os valores de força no escoamento e força máxima como indicadores dessa resistência.

Observou-se que as amostras NR1 e NR2, que correspondem ao estado como recebido, apresentam valores de resistência mecânica consideráveis. Por outro lado, as amostras T1 e T2, que foram temperadas, apresentaram uma redução significativa na resistência mecânica. Os valores obtidos foram de 343,03 MPa (T1) e 399,97 MPa (T2) para a tensão máxima. Essa redução está associada a fragilidade da microestrutura, mas também pode ser atribuída às trincas observadas nas amostras após o tratamento de têmpera. As trincas são consideradas uma das formas mais graves de descontinuidades. Elas surgem quando tensões de tração agem sobre um material enfraquecido, ou seja, incapaz de absorver essas tensões por meio de deformação (AZEVEDO, 2002). A Figura 28 mostra a propagação visível da trinca na seção de ruptura da

amostra. É possível verificar que a seção de ruptura é rompida a aproximadamente 90° graus, característico de um material frágil.

Figura 29: Propagação da trinca durante Tração – Amostra T2.



Fonte: Do Autor. 2023.

Já as amostras R1 e R2, que passaram pelo tratamento de revenimento, apresentaram uma recuperação considerável da resistência mecânica. O valor para a tensão de escoamento foi de 880,55 MPa (R1) e para a tensão máxima foi de 981,82 MPa (R1), para a tensão de escoamento foi de 812,90 MPa (R2) e para a tensão máxima foi de 906,39 MPa (R2). Isso indica um aumento na resistência mecânica do material após o revenimento, que é um processo de recozimento seguido de resfriamento controlado. O revenimento alivia as tensões residuais da têmpera, reduz a fragilidade e aumenta a ductibilidade do aço 1045 (CHIAVERINI, 2008). A Figura 29 mostra a amostra R1 após ensaio o de tração, onde é possível visualizar a região de estricção, e formato taça da região de ruptura, característica de materiais dúcteis.

Figura 30: Corpo de prova após tração – Amostra R1.



Fonte: Do Autor. 2023.

Em relação a Ductilidade e Fragilidade, deve-se observar que a ductilidade de um material é a capacidade de se deformar plasticamente antes de fraturar. Essa propriedade é geralmente avaliada por meio do alongamento percentual ($A_1\%$) durante o ensaio de tração (CHIAVERINI, 2008).

As amostras NR1 e NR2 apresentaram uma boa ductilidade, com valores de alongamento de 23,4% e 22,7% respectivamente. Esses resultados estão em conformidade com as características do aço 1045. Por outro lado, as amostras T1 e T2, que foram temperadas, apresentaram um alongamento muito baixo, de apenas 0,5% e 0,4%, respectivamente. Esse comportamento pode ser explicado pelas trincas presentes nas amostras, que atuam como pontos de concentração de tensão e levam a uma maior fragilidade do material (AZEVEDO, 2002). Já as amostras R1 e R2, que passaram pelo revenimento, apresentaram um aumento na ductilidade em comparação com as amostras temperadas. O Alongamento foi de 15,10% para R1 e de 12,37% para R2, indicando que o revenimento contribuiu para uma maior capacidade de deformação plástica do material.

Agora serão apresentados a média dos resultados obtidos no trabalho comparados com outros reportados pela literatura para o aço 1045. Além disso, as propriedades mecânicas de um aço 1045 fabricado pela empresa LASTRO também foi incluído. A Tabela 7 mostra esses resultados.

Tabela 6: Comparação dos resultados do trabalho com a literatura.

Referência	Limite de Resistência a Tração (MPa)			Limite de Escoamento (MPa)			Alongamento (%)			Descrição dos Tratamentos térmicos
	NR	T	R	NR	T	R	NR	T	R	
Próprio autor	678,14	371,5	981,82	466,92	349,27	880,55	23,05	0,45	13,73	Têmpera a 850°C por 45 minutos e resfriamento em água. Revenido a 550 °C por 45 minutos e resfriamento ao ar.
Stein et al. (2005)	-	-	980	-	-	880	-	-	28	Têmpera a 900°C por 30 minutos e resfriamento em água. Revenido a 600 °C por 30 minutos e resfriamento ao ar.
Singh e Singh (2017)	843,7	-	689,1	-	-	-	-	-	-	Têmpera a 950°C por 15 minutos e resfriamento em óleo. Revenido a 500 °C por 15 minutos e resfriamento ao ar.
Singh et al. (2021)	742	725	-	-	-	-	-	-	-	Têmpera a 850°C por 120 minutos e resfriamento em água.
Bejo et al. (2021)	924,55	-	1549,72	771,8	-	1477,33	11,38	-	-	Têmpera a 890°C por 24 minutos e resfriamento em água. Revenido a 270 °C por 20 minutos e resfriamento ao ar
Frighetto et al. (2021)	-	1543,1	1242,19	-	1436,19	1129,16	-	1,85	8,32	Não fornecido
LASTRO	605-780	-	-	430-585	-	-	19-33	-	-	-

Ao comparar as propriedades das amostras sem tratamento, percebe-se que em comparação ao aço da fabricante LASTRO, os valores estão condizentes. Entretanto, ao comparar com as três referências que testaram amostras não tratadas, os valores são inferiores. Fatores como processos de fabricação prévios e a porcentagem de carbono nas amostras, podem justificar essa diferença nos resultados. Além disso, a maior porcentagem de carbono também deve ser o principal motivo pelo qual os resultados das amostras temperadas foram inferiores aos trabalhos citados da literatura. Uma vez que quanto maior sua quantidade, mais frágil o aço. É preciso reconhecer que os resultados das amostras temperadas não estão corretos devido a presença de trincas pré-existentes que afetaram significativamente os resultados apresentados, comprometendo a integridade estrutural das amostras durante o ensaio de tração, resultando em valores de propriedades mecânicas inferiores aos esperados.

Finalmente, as propriedades mecânicas das amostras revenidas apresentaram resultados superiores aos trabalhos de Stein et al. (2005), e Singh e Singh (2017). Isso certamente pode ser atribuído ao tempo e temperatura do revenido, que foram ideais para um alívio de tensões advindo da transformação da martensita, resultando com isso, num equilíbrio ideal entre ductilidade e resistência mecânica. Conclui-se dessa forma, que os parâmetros do tratamento térmico geraram bons resultados.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento tiveram um impacto significativo nas propriedades mecânicas do aço 1045. As amostras revenidas mostraram-se mais resistentes e dúcteis, enquanto as amostras temperadas apresentaram menor resistência e ductilidade, acompanhadas pela presença de trincas. Esses resultados reforçam a importância do controle adequado dos parâmetros de tratamento térmico para obter propriedades desejadas no aço 1045.

Como sugestão de futuros trabalhos, recomenda-se:

Tratamento Térmico: Ajuste das configurações de tratamento térmico como utilizar um tempo de aquecimento menor que 45 minutos para seções de \varnothing menor que 10mm, e temperatura de têmpera menor que 850 °C.

Manufatura das Amostras: É recomendável fazer ranhuras nas superfícies de apoio para o ensaio de tração.

6. REFERÊNCIAS

ALBANO, Luigi Leonardo Mazzuco. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas de aço AISI 5160 submetidos à têmpera convencional e têmpera intensiva**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANAçosNobre.(s.d.).**Imagem engrenagem**.Recuperado de <https://acosnobre.com.br/blog/aco-1045/>. Acesso 2023.

Anselmo, G. **Estudo na Correlação de Valores de Dureza com Valores de Limite de Resistência a Tração para o Aço SAE 52100**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, São Paulo, 2017. Acesso em: Maio de 2022.

Azevedo, A. G. L. **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço SAE 1045**. Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal do Ceará, 2002.

Askeland, D.R.; Fulay, P.P.; Wright, W.J. **The Science and Engineering of Materials**. Stamford: Cengage Learning, 2014.

BRAGA, Cintia. **Análise da dureza e microestrutura dos aços AISI D2 e AISI D6 submetidos a têmpera convencional e tratamento criogênico**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia) – CEFET/MG

Bejo, F.G. et al. Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos aços SAE 1045 e SAE 1020, em diferentes condições metalúrgicas, através dos ensaios de tração unidirecional e flexão em três pontos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.

Callister Jr, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 704 p.

Callister, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7ª Edição. s.l. : LTC, 2008.

Callister Jr, W. D.; Rethwisch, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. Vol. 8º Edição, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, Nova Jersey, 2012.

Chiaverini, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1988. 576p.

Chiaverini, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos** – 7. ed. ampliada e revisada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599p.

Chiaverini, V. **Tecnologia Mecânica – Estudo e Propriedade das Ligas Metálicas** 2ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

Colpaert, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns Revisão Técnica André Luiz V. da Costa** - 4ed. São Paulo: Blucher, 2008. SILVA, A.L.C.; MEI, P.; **Aços e Ligas Especiais** 2ed. São Paulo: Eletrometal S.A Metais Especificais, 1988.

Colpaert, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2008. 652p.

Coutinho, C.A.B.; Neto, P.P.S.; Geber, L.P. **Aceleração Do Processo De Esferoidização Do Aço Perlitico Por Deformação à Frio**; Metalurgia – ABM;vol. 35; n.260;1979.

Dieter, G.E. **Metalurgia Mecânica** 2ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

Frighetto et al., **Influência dos Tratamentos Térmicos no Aço SAE 1045**. ENG MAT CON. publicado em 2021.

Hernandez, A.F. **Estudo da influência da criogenia na resistência ao desgaste abrasivo do aço ASTM 743 tipo CA6NM**, UNICAMP, 2009.

Krauss, G. **Heat treatment and processing principles**. Ohio: ASM International, 1994.

Lastro. "**Aço SAE 1045.**" Lastro. Disponível em: <https://lastro.ind.br/materias-primas/aco-sae-1045>. Acesso em 8 de junho de 2023.

Lima, D. R. S. **Desenvolvimento de tecnologia de forjamento de aço SAE 8640 destinado à produção de brocas de perfuração**. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LIPPOLD, John C.; KOTECKI, Damian J. **Welding Metallurgy and Wealdability. 2nd ed. [Metalurgia da Soldagem e Soldabilidade]**. Wiley, 2014.

Marder. A. R.; Goldstein. J.I. **Phase Transformations in Ferrous Alloys Structure-Property Relationships in Ferrous transformation Products**. AIME, 1984, pp 11-41.

MatWeb. **Online Materials Information Resource**. 2023. Disponível em: <https://www.matweb.com>

NOVIKOV, I.I. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Ed. UFRJ, 1994.

Nunes, L. de P. **Materiais: aplicações de engenharia, seleção e integridade**. Rio de Janeiro, Interciência,2012.

Oliveira, E. **Efeito dos Parâmetros de Tratamento Térmico na Microestrutura e nas Propriedades dos Aços SAE 4340 e 8640 Temperados e Revenidos**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2014. Acesso em: Maio de 2022.

Parker, E.R.; **Metallurgical Transactions 8A**, 1025 (1977).

Reed-Hill. R. E. **Princípios de Metalurgia Física**, 2ª ed., p 620 – 633, 1982

Ribeiro, L.P.P.G. **Caracterização das propriedades mecânicas do aço SAE 4140 após diferentes tratamentos de têmpera e revenido**. Dissertação de mestrado PUC, 2006.

RAJAN, T.V; SHARMA, C.P; SHARMA, Ashok. **Heat Treatment: Principles and Techniques**. [Tratamento Térmico: Principios e Tecnicas]. 2006.

Silva, Fábio. **Método e Processo de Têmpera Direta**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro Universitario UNIFACVEST, Lages, Rio Grande do Sul, 2018. Acesso em: Maio de 2022.

Silva, S. **Análise das Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4140 Submetido a Tratamento Criogênico**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2012. Acesso em: Maio de 2022.

Singh, H.; Singh, A. An Enhancement of properties of material SAE 1045 steel. **Imp. J. Interdiscip. Res**, v. 3, n. 2, p. 1678-1685, 2017.

Singh, S. et al. Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 5097-5101, 2021.

Souza, S.A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos** 5ed. São Paulo: Blucher, 1982.

Stein, C.R. et al. Efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço SAE1045. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 58, p. 51-56, 2005.

Wang. S.Y.; Wang. C.Y.; Zhao. D.L. **Effect of Double Boron Impurities on the - Iron Grain Boundary Cohesion. Journal of Alloy and Compounds**, n 368, p 308-311, 2004.