

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ESTUDO DA DISTORÇÃO POR TÊMPERA DE PLACAS
ESTAMPADAS DOS AÇOS SAE 1050 E SAE 4140**

**Isabela Luiza Rodrigues Cintra
Renata de Matos Lopes**

**Pindamonhangaba - SP
2023**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ESTUDO DA DISTORÇÃO POR TÊMPERA DE PLACAS
ESTAMPADAS DOS AÇOS SAE 1050 E SAE 4140**

Isabela Luiza Rodrigues Cintra

Renata de Matos Lopes

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação no Curso Superior de Tecnologia
em Processos Metalúrgicos

Orientador(a): Profa. MSc. Giselia Alves Souza

**Pindamonhangaba - SP
2023**

C575e Cintra, Isabela Luiza Rodrigues.
Estudo da Distorção por Têmpera de Placas Estampadas dos Aços
SAE 1050 E SAE 4140 / Isabela Luiza Rodrigues Cintra; Renata de
Matos Lopes / FATEC Pindamonhangaba, 2023.
33f.; il.

Orientador: Professora Msc. Gisélia Alves de Souza
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de
Pindamonhangaba. 2023

1. SAE 1050. 2. SAE 4140. 3. Têmpera. 4. Distorções na Têmpera.
5. Revenimento. I. Cintra, Isabela Luiza Rodrigue. II. Lopes, Renata
de Matos. III. Souza, Gisélia Alves de. IV. Título.

CDD 669

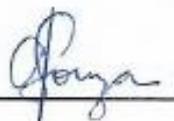
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“ESTUDO DA DISTORÇÃO POR TÊMPERA DE
PLACAS ESTAMPADAS DOS AÇOS SAE 1050 E
SAE 4140”.**

**Renata de Matos Lopes
Isabela Luiza Rodrigues Cintra**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Comissão Examinadora



Orientador – Profa. Ma. Gisélia Alves de Souza



Membro – Prof. Me. Carlos Eduardo Figueiredo dos Santos



Membro – Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho

Pindamonhangaba, 13 de dezembro de 2023.

AGRADECIMENTO

Isabela

Primeiramente, agradeço Aquele que me guia. Mesmo quando eu não sabia para onde seguir, me trouxe para o lugar certo.

A meu namorado, Fernando, que mesmo em tão pouco tempo se tornou a pessoa mais importante em minha vida. Obrigada por todo apoio, carinho e companheirismo.

A meus queridos amigos, Phillip e Carlos, que nos últimos meses tem tornado melhores os meus dias. Grande parte do prazer que sinto em seguir meu doutorado se deve a vocês.

Ao auxiliar docente da Fatec Pindamonhangaba, Luís, pela ajuda na execução das etapas do trabalho e por todo auxílio.

A nossa orientadora, profa. Giselia Alves de Souza, por todo apoio e auxílio nestes últimos meses.

A minha parceira de TG, Renata, por todo empenho e dedicação em concluir este trabalho, mesmo com todas as dificuldades que apareceram no decorrer deste caminho.

Renata

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao meu esposo Reginaldo quero expressar minha profunda gratidão, meu companheiro constante e fonte inesgotável de apoio. Sua paciência, compreensão e incentivo foram pilares fundamentais ao longo desta jornada acadêmica, a minha filha Rayane seu apoio e paciência foram excenciais, e sua presença trouxe luz aos meus dias mais difíceis. Aos meus familiares e amigos, vocês foram a força motriz por trás de cada passo que dei nesta jornada.

A professora Gisélia Alves de Souza, pelo inestimável apoio na orientação deste trabalho.

É com imensa satisfação e gratidão que dedico este espaço para expressar meu profundo agradecimento à empresa Daido Industrial e Comercial Ltda, que desempenhou um papel crucial na realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Ao Senhor Renato Amorim coordenador da qualidade, Suas orientações, colaborações e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de classe, com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver. Este trabalho não é apenas meu, mas de todos nós. Cada um teve seu impacto, e cada gesto de apoio não passou despercebido. Obrigado por serem parte fundamental da minha trajetória acadêmica e por compartilharem este momento significativo comigo.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Marthin Luther King)

CINTRA, I. L. R.; LOPES, R. M. **Estudo da distorção por têmpera de placas estampadas dos aços SAE 1050 e SAE 4140.** 2023. 45p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2023.

RESUMO

Os tratamentos térmicos, são considerados uma ferramenta fundamental e amplamente conhecida para se obter propriedades específicas em aços, como os aços SAE 4140 e SAE 1050, para serem empregados em diversos setores. Sabe-se, também, que alguns tratamentos térmicos podem resultar no aparecimento de distorções e outros defeitos nos materiais metálicos, sendo exemplo disso o tratamento térmico de têmpera. Neste trabalho, buscou-se realizar um estudo para verificação das alterações causadas nos aços SAE 4140 e SAE 1050 após o tratamento térmico de têmpera. Para isso, as amostras tratadas termicamente foram caracterizadas quanto a suas dimensões, dureza e microestrutura. Nos dois aços, foi observado uma alteração nas dimensões das amostras após o tratamento térmico, além de estas apresentarem valores de dureza inferiores aos relatados pela literatura. As estruturas, observadas via microscopia ótica, apresentaram estruturas típicas para aços temperados, sendo composto em sua maioria por martensita.

Palavras-chave: SAE 1050, SAE 4140, têmpera, distorções na têmpera, revenimento.

CINTRA, I. L. R.; LOPES, R. M. **Estudo da distorção por têmpera de placas estampadas dos aços SAE 1050 e SAE 4140.** 2023. 45p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2023.

ABSTRACT

Heat treatments are considered a fundamental and widely known tool for obtaining specific properties in steels, such as SAE 4140 and SAE 1050 steels, to be used in various sectors. It is also known that some heat treatments can result in the appearance of distortions and other defects in metallic materials, an example of which is tempering heat treatment. In this work, we sought to carry out a study to verify the changes caused in SAE 4140 and SAE 1050 steels after tempering heat treatment. For this, the heat-treated samples were characterized regarding their dimensions, hardness and microstructure. In both steels, a change in the dimensions of the samples was observed after heat treatment, in addition to their hardness values being lower than those reported in the literature. The structures, observed via optical microscopy, presented typical structures for tempered steels, being mostly composed of martensite

Keywords: SAE 1050, SAE 4140, quenching, quenching distortions, tempering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado (CCC)	4
Figura 2- Estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC)	4
Figura 3- Diagrama de Fase Fe-C	6
Figura 4- Curva CCT para o aço SAE 4140	7
Figura 5- Curva TTT para o Aço AISI 4140.	8
Figura 6- Ilustração da estrutura cristalina TCC	11
Figura 7- Seções das amostras medidas	18
Figura 8- Dispositivo para fixação das amostras(a) e forno utilizado no tratamento térmico (b)	19
Figura 9- Equipamentos utilizados para preparo das amostras. (a) cortadora metalográfica e (b) embutidora	20
Figura 10- Durômetro	21
Figura 11- Sessões das amostras analisadas via metalografia	24
Figura 12- Fotomicrografia do aço SAE 1050 da seção A - A) centro b) borda;	25
Figura 13- Fotomicrografia do aço SAE 1050 da seção B c) centro e d) borda	26
Figura 14- Micrografia do aço SAE 4140 da sessão A- A) centro b) borda	28
Figura- 15 Micrografia do aço SAE 4140 da sessão B - A) centro b) borda;	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades mecânicas do aço AISI 4140 em temperatura ambiente (25°C)	14
Tabela 2- Composição química do aço AISI 4140	15
Tabela 3- Composição química do aço SAE 1050	15
Tabela 4- propriedades mecânicas de aço 1050.....	15
Tabela 5- Composição química do aço SAE 4140	17
Tabela 6- Composição química do aço SAE 1050	17
Tabela 7- Dados do tratamento térmico do aço 1050.	19
Tabela 8- Medidas de dureza Rockwell das amostras após tratamento térmico de têmpera	22
Tabela 9- Medidas das amostras do aço SAE 1050 e SAE 4140 antes e após o tratamento térmico	23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	2
JUSTIFICATIVA	2
1.3	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 AÇOS	3
2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	4
2.3 DIAGRAMA CCT E DIAGRAMA TTT	6
2.4 TÊMPERA	8
2.4.1 <i>Formação da fase martensítica</i>	9
2.4.2 <i>Distorções na têmpera</i>	11
2.5 REVENIMENTO	12
2.6 AÇO SAE 4140.....	14
2.7 AÇO SAE 1050.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 MATERIAIS	17
3.2 METODOLOGIA.....	17
3.2.1 <i>Medição das amostras</i>	17
3.2.2 <i>Tratamento térmico</i>	18
<i>Análise metalográfica</i>	20
3.2.3	20
3.2.4 <i>Dureza Rockwell</i>	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
4.1 ANÁLISE DE DUREZA	22
4.2 MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS	23
4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	24
5. CONCLUSÕES	31

1. INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas de um aço (como dureza, ductilidade, resistência mecânica e tenacidade) estão diretamente ligadas à sua microestrutura. As diversas aplicações possíveis para um aço, requerem diferentes combinações de características, que são possíveis de serem obtidas através de tratamentos que alterem as propriedades do aço, tornando mais efetiva e segura a sua aplicação. Os tratamentos térmicos são uma maneira eficiente de modificar, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, buscando realizar alterações mais ou menos pronunciadas, de suas propriedades (OLIVEIRA; DENTI, 2007; JUNIOR et al., 2016).

As técnicas de tratamento térmico são um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que os aços são submetidos, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, visando obter propriedades específicas para a liga em questão (SILVA, 2021; OLIVEIRA; DENTI, 2007; CHIAVERINI, 2008).

O tratamento térmico de tempera é bastante aplicado na indústria para aumentar a dureza e a resistência mecânica do aço. Para isso, eleva-se a temperatura do aço acima de A3 por tempo suficiente para completa austenitização, seguido de um resfriamento rápido o suficiente para que não haja transformação perlítica e bainítica, visando a obtenção de uma estrutura dura e metaestável, chamada martensita. O resfriamento pode ser feito em meio líquido ou gasoso.. (SILVA, 2021; JUNIOR et al., 2016).

Em alguns casos, o processo de têmpera pode ocasionar a formação de uma microestrutura excessivamente dura e frágil pelo alto número de tensões internas, não sendo considerado uma condição ideal para um aço. Dito isso, o processo de têmpera normalmente é seguido de um revenido para obtenção de uma maior ductilidade e resistência ao choque (CHIAVERINI, 2008). O revenimento se trata de um aquecimento brando com finalidade de alívio às tensões internas após a têmpera, permitindo uma combinação de resistência e tenacidade. Como já é conhecido, o revenimento, minimiza as tensões internas geradas pela têmpera, porém não as elimina por completo. Com isso, mesmo após o revenimento, as amostras temperadas podem apresentar distorções e defeitos (SILVA, 2021).

1.1 PROBLEMA

O tratamento térmico desempenha um papel fundamental na melhoria das propriedades mecânicas de ligas metálicas, como os aços SAE 4140 e SAE1050. No entanto, é amplamente reconhecido que o tratamento térmico pode levar à distorção dimensional dessas ligas, o que representa um desafio significativo na indústria de fabricação. Portanto, o problema central a

ser investigado neste estudo é: verificar como a distorção após o tratamento térmico afeta o aço SAE4140 e o aço SAE1050, e quais são os fatores que influenciam essa distorção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o efeito dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, na microestrutura e propriedades dos aços SAE 4140 e SAE 1050.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Tratar termicamente os aços SAE 4140 e SAE 1050, por têmpera e revenimento.
- realizar a medição das dimensões das peças, antes e após o tratamento térmico.
- Aferir a dureza Rockwell das amostras de ambos os aços, antes e após o tratamento térmico.
- Analisar a microestrutura dos aços temperados, via microscopia ótica.

1.3 JUSTIFICATIVA

Como já é conhecido, os tratamentos térmicos são técnicas utilizadas para modificar as propriedades dos aços, visando obter propriedades específicas para determinadas aplicações. Entretanto, após os tratamentos térmicos, podem surgir nos materiais distorções e defeitos resultantes de mudanças estruturais e do aparecimento de tensões internas. Estas distorções causadas são um grande empecilho para aplicação dos aços tratados, podendo resultar na inutilização de peças já prontas. Com isso, este trabalho visa estudar as alterações estruturais, dimensionais e de dureza nos aços SAE 4140 e SAE 1050 temperados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS

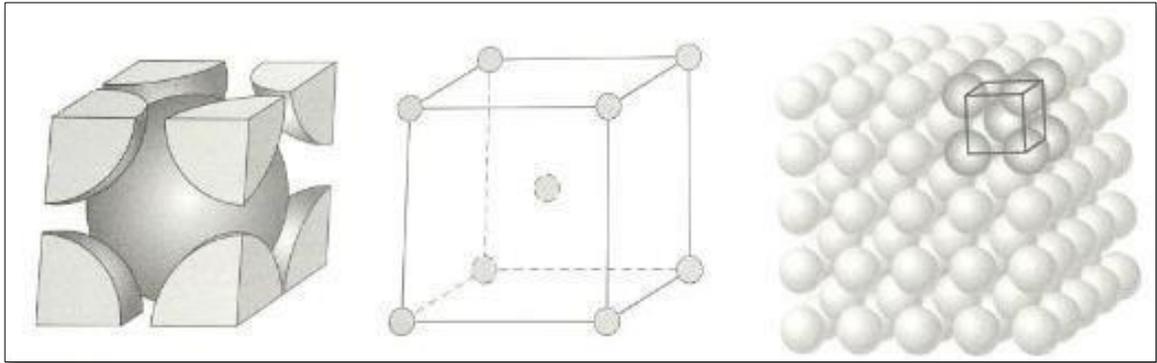
O aço é o material mais versátil das ligas metálicas, sendo produzido em grande variedade de tipos, formas, graus, tamanhos e condições; para atender a uma ou mais aplicações específicas (MACHADO; LOUZADA, 2022). A maioria dos tipos de aço (especialmente aço de médio carbono) possuem elevadas propriedades mecânicas, como usinabilidade, propriedades de impacto, soldabilidade e alta resistência. Por isso tem inúmeras aplicações industriais. Além disso, suas propriedades físicas e mecânicas podem ser alteradas por tratamento térmico para diferentes usos (SINGH et. al., 2021)

Suas propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, que para aços normalmente é inferior a 1%. A classificação dos aços pode se dar de acordo com a sua concentração de carbono, como os tipos com baixo, médio e elevado teor de carbono. Em cada grupo, também podem ser definidos subgrupos de acordo com as concentrações de outros elementos de liga na composição. Geralmente, os aços comuns ao carbono contêm apenas pequenas concentrações de impurezas além do carbono e de um pouco de manganês. Já no caso dos aços-liga, mais elementos de liga são adicionados intencionalmente em concentrações específicas (CALLISTER, 2002; MACHADO; LOUZADA, 2022).

A microestrutura dos aços pode, geralmente, ser classificada como (BORTOLETO, 2010):

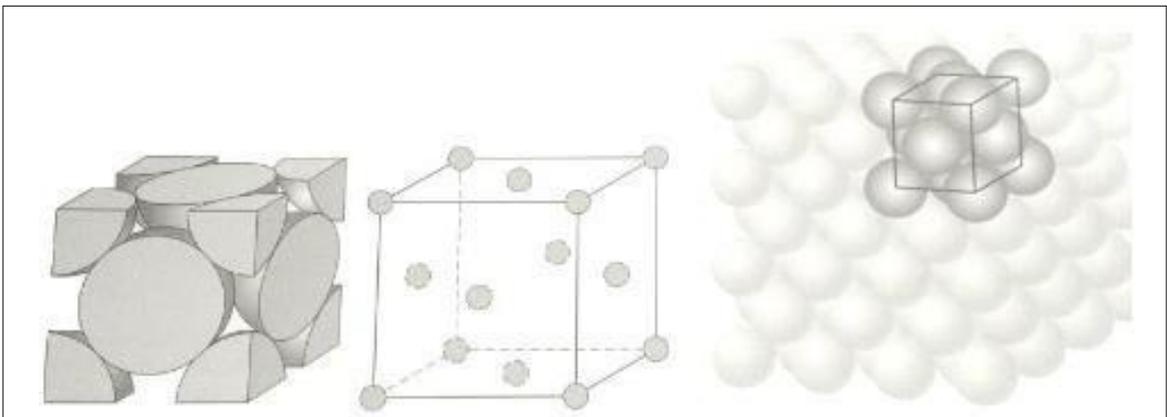
- Ferrita: Solução sólida do carbono em ferro α , com estrutura CCC (Figura 1);
- Austenita: Solução sólida do carbono em ferro γ , com estrutura CFC (Figura 2);
- Cementita: Carboneto de ferro (Fe_3C);
- Perlita: Produto da transformação austenítica composto de ferrita e cementita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$);
- Bainita: composto de ferrita e cementita (com faixa de temperatura e resfriamento entre a martensita e perlita);
- Martensita: Produto de austenitização com taxa de resfriamento rápida, com estrutura tetragonal de corpo centrado ou TCC.

Figura 1- Estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado (CCC)



Fonte: (PUHL, 2017)

Figura 2- Estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC)



Fonte: (PUHL, 2017)

Uma das maneiras mais empregadas para modificar a estrutura de aços é pelo tratamento térmico que, quase sempre está ligado a mudança de microconstituente e com isso a mudança da estrutura cristalina. Essas transformações cristalinas resultam em mudanças nas propriedades térmicas, mecânicas, volumétricas e de solubilidade, podendo causar deformações e tensões residuais internas no aço (BORTOLETO, 2010).

2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos podem ser definidos como processos em que o metal é aquecido e resfriado (geralmente em temperaturas extremas), com o objetivo de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem deixar que mudem de forma (SINGH; SINGH, 2017; SINGH et al., 2021). Geralmente, estas propriedades são modificadas para que os componentes estruturais

sejam capazes de suportar condições operacionais especificadas e tenham a vida útil desejada. (SINGH; SINGH, 2017).

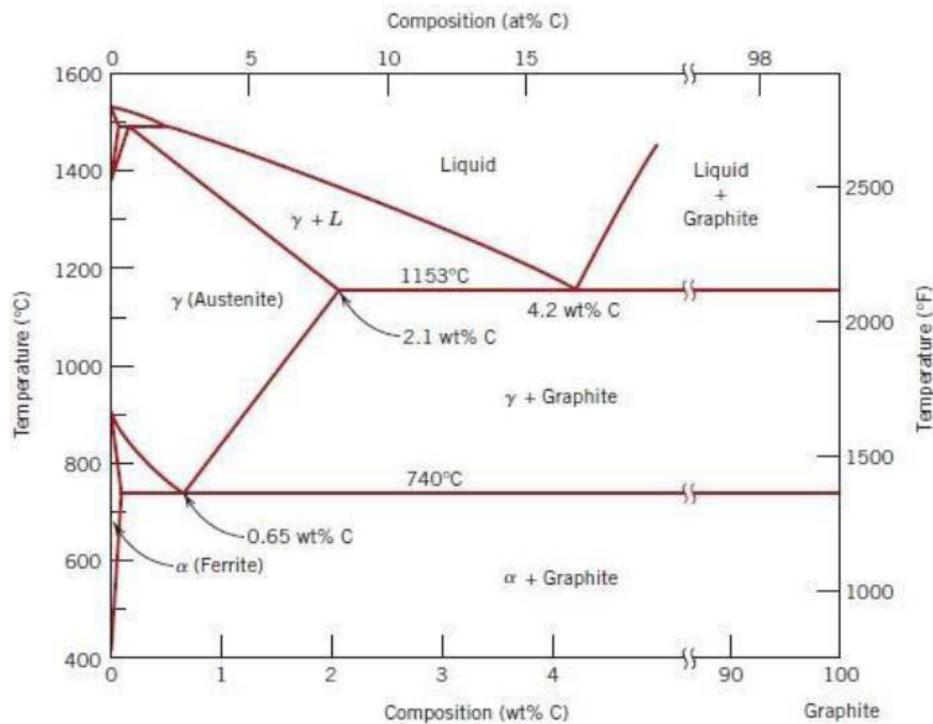
Diversas pesquisas foram realizadas para estudar o efeito de diferentes processos de tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço. Além de ser um método utilizado para fortalecer materiais, os tratamentos térmicos também podem ser utilizados para melhorar a conformabilidade, usinagem, etc. (SINGH; SINGH, 2017), ductilidade, eliminar tensões internas e suavizar grãos de metal (CALLISTER, 2007; MULYADI et al 2021). A dureza, a resistência ao impacto, a resistência à tração e a ductilidade do aço carbono também podem ser modificadas pelo tratamento térmico (SINGH et al, 2021).

Comumente, os tratamentos térmicos são aplicados em áreas metalúrgicas, porém também podem ser utilizados na fabricação de vidro, alumínio, aço e muitos outros materiais. São processos de fabricação muito importantes que podem, além de ajudar no processo de fabricação, melhorar o produto, desempenho e suas características de várias maneiras (SINGH; SINGH, 2017).

As propriedades dos metais são fortemente influenciadas por sua microestrutura, devido a isso alterações microestruturais afetam diretamente suas propriedades e características. Portanto, o conhecimento e controle dos parâmetros utilizados nos tratamentos térmicos aplicados é fundamental para a obtenção do resultado desejado. Os fatores que influenciam o processo de tratamento térmico são a temperatura de aquecimento (ou a temperatura utilizada), a taxa de aquecimento (o tempo necessário para atingir a temperatura desejada) e a velocidade de resfriamento quando o metal atinge a temperatura estabelecida (MULYADI et al, 2021).

Uma maneira eficiente para determinar o tratamento térmico a ser utilizado, bem como os parâmetros empregados no processo é a utilização do Diagrama de Fase Fe-C (Figura 3). O diagrama de fases é um diagrama que mostra a relação entre as mudanças de fase que ocorrem durante o lento processo de resfriamento e aquecimento e o teor de carbono (CALLISTER, 2007; MULYADI et al, 2021).

Figura 3- Diagrama de Fase Fe-C



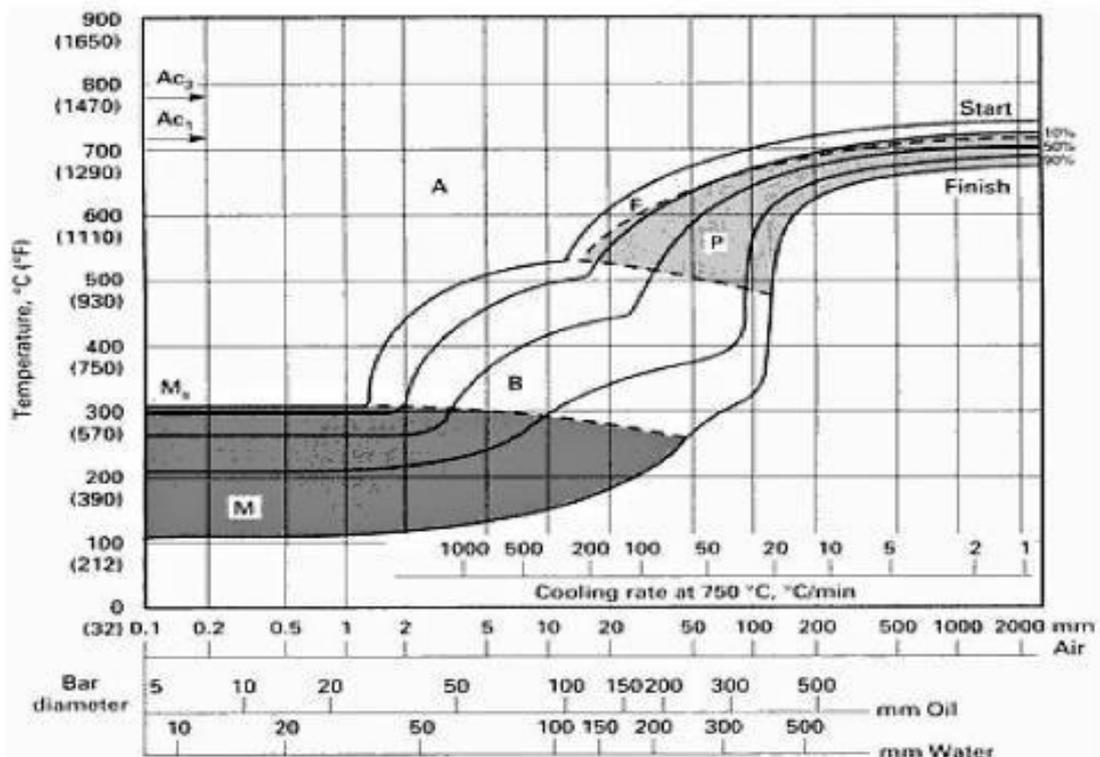
Fonte: (MULYADI et al, 2021)

Além do diagrama de fases, também pode ser utilizado o Diagrama de Transformação de Resfriamento Contínuo (CCT) e o diagrama de temperatura de transformação de tempo (TTT) para auxiliar na determinação dos parâmetros de temperatura (MULYADI et al, 2021).

2.3 DIAGRAMA CCT E DIAGRAMA TTT

O Diagrama de Transformação de Resfriamento Contínuo (CCT) apresenta a relação entre a taxa de resfriamento contínuo e a fase ou estrutura formada após a transformação de fase. Os usos de diferentes taxas de resfriamento produzirão diferentes fases ou estruturas de aço. Cada curva de resfriamento mostra o início e o fim da decomposição da austenita até a fase final do aço (SILVA, 2012). De acordo com o Diagrama CCT, também podem ser definidos os meios de resfriamento empregados para obtenção de determinada microestrutura, pois relaciona a taxa de resfriamento com as regiões de formação da perlita, ferrita, bainita e martensita. (MULYADI et al 2021). Na Figura 4, está apresentado o diagrama CCT do aço SAE 4140.

Figura 4-Curva CCT para o aço SAE 4140



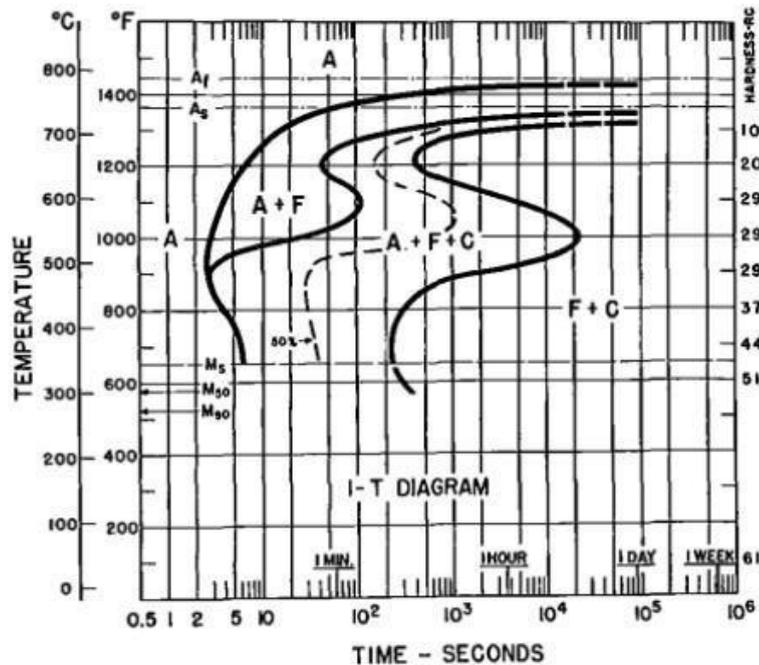
Fonte: (MULYADI et al, 2021).

A velocidade de resfriamento a qual o material é submetido afeta diretamente a proporção entre as fases encontradas no material, sendo isso um fator determinante de características físicas e mecânicas como dureza, tenacidade, ductibilidade, entre outros (BORTOLETO 2010).

Para o maior domínio sobre o processo de tratamento térmico é necessário conhecer a curva Tempo-Temperatura-Transformação (TTT), também conhecido como diagrama de transformação isotérmica. Este diagrama ajuda a prever a relação entre as fases ou estruturas formadas após a transformação de fase devido às mudanças de temperatura e tempo (MACHADO; LOUZADA, 2022). Um diagrama TTT típico para o aço SAE 4140 é apresentado na Figura 5.

Figura 5- Curva TTT para o Aço AISI 4140.

Type: 4137/4140
Composition: Fe - 0.37% C - 0.77% Mn - 0.98% Cr - 0.21% Mo
Grain size: 7-8 Austenitized at 843°C (1550°F)



Fonte: (MACHADO; LOUZADA, 2022)

Neste diagrama, o tempo de transformação em uma determinada temperatura é representado através da transformação isotérmica, que ocorre numa temperatura fixa após um resfriamento instantâneo. Podemos observar as linhas horizontais M_s e A_f , que marcam o início e o fim da transformação da austenita em martensita (RASMA, 2015; MACHADO; LOUZADA, 2022).

2.4 TÊMPERA

A têmpera é um tratamento térmico amplamente empregado, que constitui no aquecimento do aço (temperaturas de 750°C até 1250°C) visando a austenitização total, para que os carbonetos dos elementos de liga se dissolvam, seguido de resfriamento rápido de uma peça com o objetivo de obter propriedades específicas no material., onde o constituinte final desejado é a martensita, aumentando a dureza e resistência à tração (SINGH; SINGH, 2017; CARVALHO et al, 2015; PUHL, 2017).

Uma das funções da têmpera é evitar a ocorrência de processos indesejados de baixa

temperatura no material, como as transformações de fase. Isso ocorre devido a janela de tempo em que essas reações indesejadas são termodinamicamente favoráveis e cineticamente acessíveis são reduzidas (SINGH; SINGH, 2017).

Este processo de tratamento térmico é mais comumente usado para endurecer o aço através da introdução de martensita na estrutura, para que isso ocorra o aço deve ser resfriado rapidamente até seu ponto eutetóide (a temperatura na qual a austenita se torna instável). Se a porcentagem de carbono for inferior a 0,4 por cento, a têmpera não é possível (SINGH; SINGH, 2017)

2.4.1 Formação da fase martensítica

A martensita nas ligas ferrosas pode ser considerada como uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro, com uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), que é uma forma distorcida da ferrita com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) (HUALLPA 2011). Essa fase é formada quando ligas ferro-carbono austenitizadas são resfriadas rapidamente até uma temperatura relativamente baixa (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Uma transformação martensítica é definida como uma “transformação dominante de cisalhamento, sem difusão, distorcida pela rede, ocorrendo por nucleação e crescimento”. A definição descreve a formação de martensita como ocorrendo pela formação inicial de um núcleo que se estende progressivamente até sua dimensão final pelo crescimento (VILLA, 2013; PUHL 2017).

O processo de transformação martensítica não é muito bem compreendida. Porém, grandes números de átomos no material têm movimentos cooperativos, existindo apenas um pequeno deslocamento de cada átomo em relação a seus vizinhos. Dessa forma, a austenita, com estrutura CFC, apresenta transformação polimórfica em martensita tetragonal de corpo centrado TCC (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Como a transformação martensítica não envolve difusão, ela ocorre quase instantaneamente: os grãos de martensita nucleiam e crescem em uma taxa muito rápida, fazendo com que a taxa de transformação martensítica independe do tempo. O rápido crescimento dos núcleos de martensita é interrompido quando há o encontro com o contorno de grão austenítico, martensítico ou outras partículas (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). A quantidade da estrutura martensítica no material cresce conforme a temperatura diminui (CHIAVERINI, 2008; PUHL 2017).

Geralmente, a martensita em sistemas ferrosos é uma estrutura monofásica que não está em equilíbrio pois não é a configuração energeticamente mais favorável do sistema, resultante

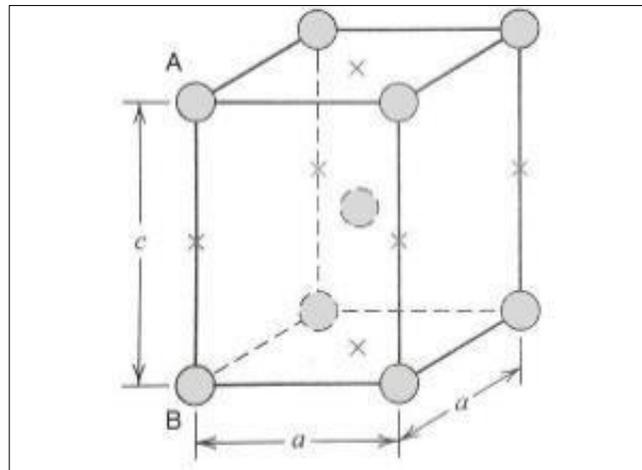
de uma transformação adifusional da austenita (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Apesar de sua metaestabilidade, a martensita é formada pois a obtenção de um estado de equilíbrio envolveria a partição de átomos que não pode ser obtida com rapidez suficiente nas condições dadas. O desenvolvimento da martensita está associado à introdução de uma grande energia de deformação e inúmeras novas interfaces e energia interfacial associada (VILLA, 2013).

Para obtenção da estrutura martensitica é necessário que o aço atinja temperaturas de austenitização. Para isso, a ferrita (estrutura CCC) é aquecida de maneira a gerar uma transformação polimórfica da estrutura para a austenita (estrutura CFC). As temperaturas empregadas dependem do teor de carbono, utilizando temperaturas de 40°C a 60°C acima da temperatura crítica. Ainda, para que ocorra completa homogeneização, é necessário um tempo de aquecimento controlado, transformando a estrutura polimórfica de ferro α para ferro γ (ALBANO, 2012; BARREIRO, 1985; PUHL 2017).

Após a autenitização do aço, ele é resfriado de forma rápida e em temperaturas inferiores a M_s (temperatura de início de transformação da martensita), para que a transformação de austenita em martensita ocorra. Com a elevada taxa de resfriamento ocorre a supersaturação de carbono, devido à falta de tempo suficiente para a difusão do carbono, ocorrendo também a distorção do reticulado cristalino pela formação da estrutura TCC (PUHL 2017).

A formação da estrutura martensítica causa o surgimento de tensões internas restringindo assim a movimentação das discordâncias, resultando em um aumento de resistência mecânica (BERRAHMOUNE, 2006). O átomo de carbono presente em solução intersticial no ferro α , transforma o reticulado ao redor em reticulado tetragonal ao invés de cúbico. A forma tetragonal formada ocorre devido aos átomos de carbono se posicionarem na aresta do cubo entre os átomos de ferro localizados no vértice (Figura 6), aumentando a distância entre os átomos A e B de ferro e diminuindo o espaço nas direções transversais a . (CHIAVERINI, 2008; CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Figura 6- Ilustração da estrutura cristalina TCC



Fonte: (PUHL, 2017)

2.4.2 Distorções na têmpera

Distorção é definido com a alteração de forma ou alteração dimensional de um material. Este termo é muito usado em técnicas de tratamentos térmicos, já que independente das precauções tomadas a distorção pode ser algo inevitável. Segundo Lemos (2012) a distorção pode ocorrer de duas formas ou sendo uma combinação de ambas:

- Distorção de forma,
- Distorção de tamanho

Quando falamos de tratamento térmico, a distorção de forma ocorre muitas vezes na etapa de aquecimento (austenitização do aço) (LEMOS, 2012). O tratamento termico de têmpera, com a formação da estrutura martensítica, comumente causa distorções geométricas indesejadas nas peças temperadas. Isto se deve ao fato de que a taxa crítica de resfriamento do respectivo material deve ser excedida para produzir os valores de dureza exigidos. Dependendo do meio de têmpera, das dimensões e do material do componente, este requisito pode levar a grandes gradientes de temperatura que, por sua vez, geram tensões térmicas. (R. FECHTE-HEINEN, TH. LÜBBEN, 2021). A precisão dimensional dessas peças é afetada e leva a perdas econômicas e de produção. Vários fatores, incluindo transformação de fase do aço, austenita retida, meio de têmpera, severidade e uniformidade e seleção do processo podem influenciar a dimensão final de uma peça temperada. (SILVA et al 2012) (R. FECHTE-HEINEN, TH.

LÜBBEN, 2021).

Durante o resfriamento da peça temperada, ocorre contração térmica da estrutura até o início da formação da martensita na temperatura M_s . Ao atingir essa temperatura, o volume aumenta e o comprimento do corpo de prova aumenta. Quando resfriados até a temperatura ambiente, alguns aços martensíticos podem conter austenita retida. Quanto maior a quantidade de austenita retida no aço temperado, menor é o crescimento em volume e no comprimento do corpo de prova (DORES, 2018).

Alem do efeito da expansão volumétrica induzida pela transformação de fase austenita-martensita), as distorções nas amostras temperadas também podem ser influenciadas pela interação entre variáveis do processo, como a temperatura de austenitização, imersão velocidade e direção, temperatura e agitação do meio de têmpera e geometria dos componentes tratados, entre outros fatores (LOPEZ GARCIA, 2022). Alterações dimensionais e de forma podem ser causadas por alterações de volume ou deformações. Tais alterações podem ser induzidas por vários processos num componente (R. FECHTE-HEINEN, TH. LÜBBEN, 2021).

As alterações de volume causam, inicialmente, alterações de densidade e massa. Alterações na massa das amostras ocorre em todo tratamento termoquímico, devido ao fato que átomos adicionais são introduzidos em áreas próxima à superfície. As tensões de carga também podem levar a alterações dimensionais e de forma. Os acessórios de têmpera podem ser considerados exemplos disso, que são usados para a geração direcionada de forças de endireitamento ao temperar certos grupos de componentes (como anéis sincronizadores, luvas deslizantes, corpos de acoplamento e engrenagens de coroa). O próprio peso do componente atua como uma tensão de carga (R. FECHTE-HEINEN; TH. LÜBBEN, 2021).

A geometria da peça tratada, também deve ser considerada fator influente na ocorrência de distorções na peça. Quando a peça é assimétrica, ou seja, possui sessões com massa diferentes, a sessão com menor massa tende a resfriar mais rapidamente quando comparada a uma sessão com maior espessura. O mesmo acontece quando uma das sessões possui em uma área de superfície significativamente maior. Essa divergência entre o resfriamento de diferentes áreas da peça, leva ao aparecimento de tensões que podem fazer com que haja alterações dimensionais após o tratamento térmico (R. FECHTE-HEINEN, TH. LÜBBEN, 2021).

2.5 REVENIMENTO

A martensita, além de possuir elevada dureza é extremamente frágil, tornando impossível sua utilização para a grande maioria das aplicações. A fragilidade decorrente da microestrutura é agravada pelas tensões internas decorrentes do próprio tratamento (SANTOS, 2013).

O revenimento é o tratamento térmico que, de modo geral, sempre acompanha a têmpera. Esta técnica de tratamento térmico é aplicada a ligas ferrosas (como aço ou ferro fundido), e é utilizada com o intuito de aumentar a resistência ao choque, aliviar as tensões internas, minimiza a fragilidade e a instabilidade dimensional da estrutura, sem comprometer significativamente a dureza do material (SINGH; SINGH, 2017; ROSA, 2015).

O tratamento térmico é realizado pelo aquecimento controlado da peça resfriada. Esse processo é feito aquecendo o metal a uma temperatura abaixo do ponto crítico por um determinado período, deixando-o esfriar ao ar parado. A temperatura exata determina a quantidade de dureza removida e depende tanto da composição específica da liga quanto das propriedades desejadas no produto acabado. Ferramentas com elevada dureza são frequentemente revenidas em baixas temperaturas, enquanto as moles são revenidas em temperaturas muito mais altas (SINGH; SINGH, 2017).

O procedimento deste tratamento consiste em aquecer o aço uniformemente a temperaturas inferiores a temperatura A_{c1} (temperatura abaixo da zona crítica), mantendo-o nesta temperatura por tempo suficiente para balancear as propriedades desejada (ROSA, 2015). Segundo SCHLATTER (2012), no revenimento podem ser observadas as seguintes transformações microestruturais:

- Até 100 °C ocorre redistribuição dos átomos de carbono para discordâncias gerando uma precipitação na matriz. (SCHLATTER, 2012).
- De 100 a 350 °C ocorre a precipitação dos carbonetos ϵ nas discordâncias e nos contornos de martensita lenticular, pode ocorrer também a precipitação da cementita, ou cementita combinada a carbonetos χ . Na faixa de 200 a 300°C a austenita retida em aços de médio teor de carbono se decompõe, viabilizando a formação de martensita. Nesta faixa de temperatura, devido ao empobrecimento da martensita até aproximadamente 0,25% de carbono, ocorrendo então a perda da tetragonalidade da martensita (SANTOS, 2013; SCHLATTER, 2012).
- Temperaturas superiores a 300 °C, inicia-se o processo de recuperação da martensita combinado ao processo de esferoidização das partículas de cementita. a austenita retida é decomposta em bainita e os carbonetos χ são dissolvidos dando lugar à precipitação de finas plaquetas de cementita e de carboneto χ nos contornos das agulhas de martensita e no seu interior. Devido a isso, ocorre a queda de dureza e de resistência mecânica (SANTOS, 2013).
- Entre 570 e 680 °C, em aços constituídos por elementos de liga ocorre a precipitação de carbonetos aumentando a resistência e a dureza (SANTOS, 2013).

2.6 AÇO SAE 4140

O aço SAE 4140, também conhecido como aço-cromo-molibdênio é classificado como aço médio carbono ligado para beneficiamento (MACHADO; LOUZADA, 2022). Esse metal pode ser encontrado como barra, vergalhão, peças forjadas, chapas, placas, tiras e peças fundidas. Geralmente, é utilizado em aplicações que requeiram uma combinação de endurecimento moderado e uma excelente resistência aliada a ductilidade e tenacidade, mas em que as condições de serviço sejam moderadamente severas (CARVALHO et al, 2015).

Devido a suas propriedades, apresentada na Tabela 1, pode ser aplicado para fabricação de peças como bielas, virabrequins, juntas de direção, eixos, peças de bombas, tubulação de alta pressão, grandes engrenagens industriais, flanges, peças de máquinas-ferramenta, chaves e pregos (CARVALHO et al, 2015; SILVA, 2012).

Tabela 1- Propriedades mecânicas do aço AISI 4140 em temperatura ambiente (25°C)

Propriedades	Tratamento térmico	
Densidade (kg/m ³)	7,7 -8,03	
Coefficiente de Poisson	0,27-0,3	
Módulo de Young (Gpa)	190-210	
Resistencia a tensão (Mpa)	655	
Tensão de escoamento (Mpa)	417,1	Normalizado a 870 °C
Alongamento (%)	25,7	
Redução de área (%)	56,9	
Dureza (HB)	197	Temperado a 815 °C
Resistencia ao impacto (J)	54,5	

Fonte: (Adaptado de SILVA, 2012)

As metodologias mais utilizadas para se obter propriedades aprimoradas são a têmpera e o revenimento. A aplicação destes tratamentos térmicos resulta em uma tensão de ruptura do material de aproximadamente 1650 MPa, podendo-se utilizar esse aço em temperaturas elevadas (como 480°C) onde geralmente acima dessa temperatura a tensão de ruptura decresce rapidamente (MACHADO; LOUZADA, 2022). Os valores para a composição química do aço 4140 estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Composição química do aço AISI 4140

	Carbono	Manganês	Silício	Cromo	Molibdênio
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,35	0,80-1,10	0,15-0,25

Fonte: (MACHADO; LOUZADA, 2022)

2.7 AÇO SAE 1050

O aço 1050 é um tipo de aço carbono com cerca de 0,50% de carbono, conhecido por sua alta tenacidade e resistência. O aço 1050 é frequentemente utilizado na fabricação de peças mecânicas devido à sua capacidade de ser endurecido por têmpera, proporcionando uma excelente combinação de resistência e ductilidade. Além disso, sua composição química, conforme detalhado pela norma ASTM A29/A29M, inclui 0,48-0,55% de carbono, 0,60-0,90% de manganês e traços de outros elementos (ASTM INTERNATIONAL, 2018; GAMBONI et al.,2020). Tabela 3 esta apresentada a composição química do aço 1050.

Tabela 3- Composição química do aço SAE 1050

1050	C	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Si
%	0,501	0,656	0,0067	0,0211	0,172	0,0812	0,0670	0,0050	0,147

Fonte: (GAMBONI, et al, 2020)

Este tipo de aço é conhecido por sua satisfatória tenacidade, que se traduz na capacidade de resistir a impactos sem romper, tornando-o adequado para aplicações em que a resistência a choques é importante. O aço SAE 1050 também possui propriedades de soldabilidade e usinabilidade, o que o torna ideal para a fabricação de eixos, virabrequins, engrenagens e outros componentes mecânicos. Para melhorar as propriedades mecânicas e evitar problemas como tensões internas, empenamentos e desgastes, é comum aplicar tratamentos térmicos específicos a esse aço de acordo com as exigências do projeto (SILVA, 2012; GAMBONI et al.,2020). Na Tabela 4 estão apresentadas algumas das principais propriedades do aço SAE 1050.

Tabela 4- propriedades mecânicas de aço 1050

	Resis. À tração (Kgf/mm²)	Along.Em 2” (%)	Dureza Brinell	Resist. Ao Choque (Kgj.m)
--	---	----------------------------	-----------------------	--------------------------------------

1050 temperado e revenido	66,5 – 105,0	10 - 30	190 - 320	2,2 -6,9
--	--------------	---------	-----------	----------

Fonte: (CHIAVERINI, 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Neste trabalho foram estudados os aços SAE 4140 e SAE 1050, fornecidos pela empresa Daido Industrial de Taubaté Ltda. As peças fornecidas foram fabricadas por laminação e estampagem. Na Tabela 5 e na Tabela 6, estão apresentadas a composição química do aço SAE 4140 e SAE 1050, respectivamente.

Tabela 5- Composição química do aço SAE 4140

	C	Mn	Si	Cr	Mo
SAE 4140	0,38-0,45	0,60-1,00	0,15-0,40	0,80-1,20	0,15-0,30

Fonte: autores (2023)

Tabela 6- Composição química do aço SAE 1050

	C	Mn	P máx	S máx	Si
SAE 1050	0,48-0,55	0,60-0,90	0,040	0,050	0,40 máx

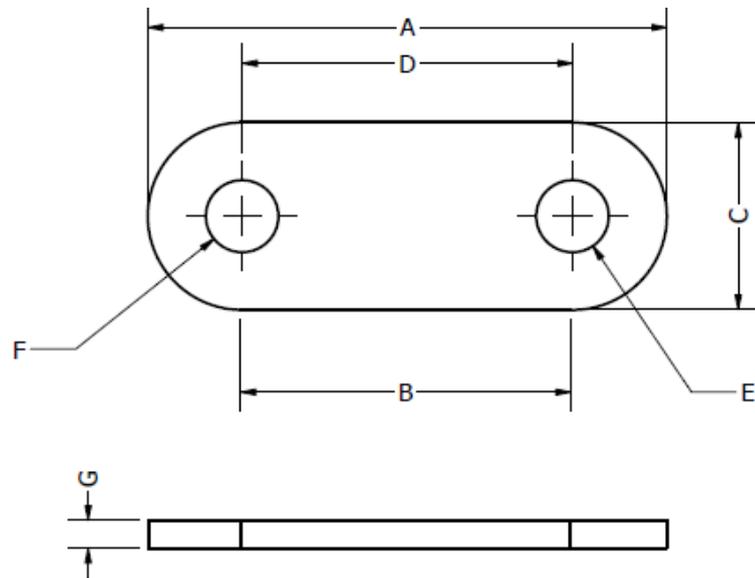
Fonte: autores (2023)

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Medição das amostras

Com o intuito de avaliar a deformação das amostras após o tratamento térmico, as peças como recebidas e após o tratamento de têmpera e revenimento, foram medidas sistematicamente, utilizando um paquímetro. As seções medidas são apresentadas na Figura 7.

Figura 7- Seções das amostras medidas



Fonte: autores (2023)

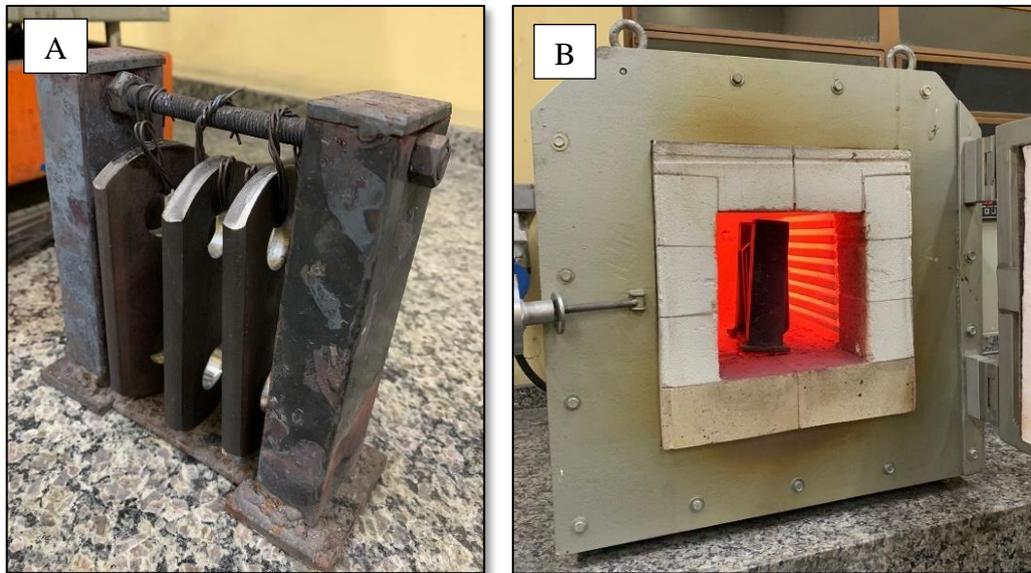
3.2.2 Tratamento térmico

Para avaliar a deformação nas amostras do aço SAE 4140 após o tratamento térmico de têmpera, três amostras foram tratadas.

Para a têmpera, inicialmente, as amostras foram fixadas em um dispositivo (Figura 8 (a)) e colocadas em um forno da marca Eletrothermo (Figura 8 (b)), já aquecido á 855°C, onde permaneceu por 30 minutos. Os parâmetros utilizados foram previamente definidos, onde a temperatura utilizada foi estabelecida de acordo com a temperatura de austenitização do aço, conforme Guia de Tratamento Térmico da ASM (Chandler, 1994), e o tempo definido de acordo com a espessura da amostra (aproximadamente 3 minutos por mm).

Após o período de 30 minutos, as amostras foram cuidadosamente retiradas do forno e, imediatamente resfriadas em óleo.

Figura 8-Dispositivo para fixação das amostras(a) e forno utilizado no tratamento térmico (b)



Fonte: autores (2023).

Após completamente resfriadas as amostras foram submetidas ao tratamento térmico de revenimento, onde foram aquecidas a 440°C por um período de 2 horas, e em seguida foram resfriadas ao ar. O tratamento térmico das amostras do aço SAE 4140 foi realizado no laboratório de Tratamento Térmico da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba (FATEC).

As amostras do aço SAE 1050, foram fornecidas já tratadas térmicamente (têmpera e revenimento). O tratamento térmico foi realizado na empresa Daido Industrial de Taubaté Ltda (CNPJ 45.175.387/0001-55), e os parâmetros utilizados para o tratamento térmico estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Dados do tratamento térmico do aço 1050.

Material	Pré Aquecimento	Tempo	Temp. Austenitização	Tempo	Resfriamento
SAE 1050	450 ± 50° C	45 ± 15 minutos	880 ± 20° C	60 min por polegada	Óleo

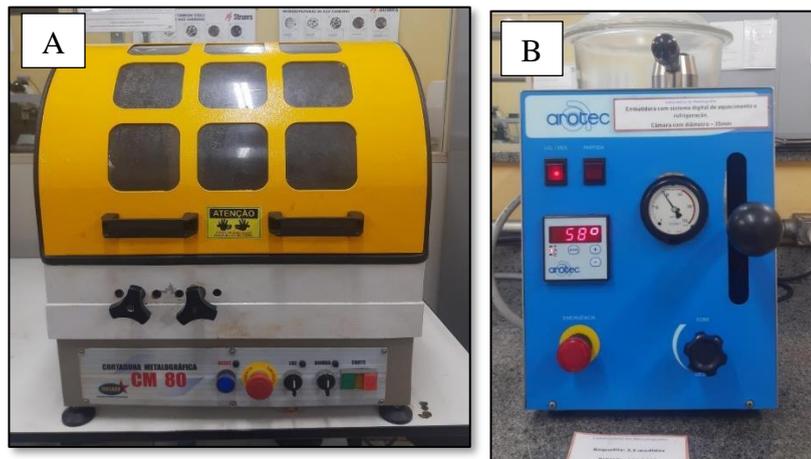
Fonte: autores (2023)

Após a realização dos tratamentos térmicos, as amostras foram medidas e analisadas quanto a sua microestrutura e dureza.

3.2.3 Análise metalográfica

As amostras tratadas termicamente foram caracterizadas a fim de visualizar suas microestruturas constituintes. Inicialmente, as amostras foram cortadas em uma cortadora metalográfica da marca Teclago (Figura 9 (a)) e embutidas a quente em baquelite, por meio de uma embutidora da marca Arotec (Figura 9 (b)).

Figura 9- Equipamentos utilizados para preparo das amostras. (a) cortadora metalográfica e (b) embutidora.



Fonte: autores (2023).

As amostras embutidas foram lixadas numa sequência de lixas d'água com granulometria de 80, 180, 220, 360, 400, 1200, 1500, 2000. Posteriormente, foram polidas em uma politriz circular da marca Arotec com sílica 0,05 μm até obterem uma superfície espelhada.

Por fim, as amostras foram atacadas utilizando solução de Nital 2%. Em seguida, foi observada a microestrutura das amostras, utilizando para isso um microscópio ótico da marca Olympus(U-TV0.5XC-3). A análise de microscopia das amostras foi realizada no laboratório de Metalografia da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba.

3.2.4 Dureza Rockwell

Após o tratamento térmico, foi aferida a dureza das amostras do aço SAE 4140 e SAE 1050. Para isso foi utilizada a escala Rockwell, utilizando um durômetro da marca PANANTEC ATMI, modelo RASN. Para o ensaio foi utilizado uma carga de 150 kgf. O equipamento utilizado está apresentado na Figura 10.

Figura 10- Durômetro



Fonte: autores (2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DE DUREZA

Após a realização do tratamento térmico de têmpera e revenimento, foi aferida a dureza dos aços estudados. Na Tabela 8, estão apresentados os valores de Dureza Rockwell obtidos para as amostras do aço SAE 4140 e SAE 1050.

Tabela 8- Medidas de dureza Rockwell das amostras após tratamento térmico de têmpera

Medidas	1050		4140	
	Centro	Bordas	Centro	Bordas
1	43	40	28,5	36,33
2	44	40	30,75	35,67
3	43	38,5	31	35,67
4	42	40	29,25	34,67
5	43	39	30	34,67
Média	43 ± 0,70	39,5 ± 0,70	29,9 ± 1,03	35,4 ± 0,72

Fonte: autores (2023).

Conforme pode ser observado por meio dos dados apresentados na Tabela 9, a amostra do aço SAE 4140 apresentou diminuição de aproximadamente 16% da dureza no centro da amostra, quando compara a encontrada nas bordas. Já a amostra do aço SAE 1050 apresentou uma dureza 8% maior na região central da amostra, quando comparada as bordas. Esta divergência de dureza entre regiões da peça pode ser um indicativo que estas regiões possuem microestruturas diferentes, devido as regiões centrais da peça necessitarem de mais tempo para resfriar.

Carvalho e colaboradores (2015), analisaram a dureza do aço SAE 4140 submetido ao tratamento térmico de têmpera, utilizando diferentes meios de resfriamentos (em água, salmoura e óleo), seguida do tratamento térmico de revenimento. Os autores observaram que, no material resfriado em óleo o aço apresentou uma dureza Rockwell de 52,1 HRC.

Gamboni e colaboradores (2020), realizaram um estudo do aço SAE 1050 temperado, resfriado em diferentes meios. Eles encontraram, para o aço resfriado em óleo, uma dureza de aproximadamente 40 HRC.

Neste trabalho, os valores de dureza média encontrados para o aço SAE 4140 e SAE 1050 foram inferiores ao encontrado na literatura. Entretanto, este resultado pode ser atribuído a limitações do forno utilizado para realização do tratamento térmico, do durômetro utilizado

para aferição da dureza, ou também ao uso de diferentes temperaturas de revenimento. Além de que as amostras foram tratadas em fornos diferentes, sendo a amostra do aço SAE 1050 tratada em um forno industrial

4.2 MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS

Antes e após o tratamento térmico de têmpera e revenimento, foi aferida as dimensões das sessões das amostras, a fim de verificar a presença de distorções. Na Tabela 9 estão apresentadas as medidas dos aços SAE 1050 e SAE4140.

Tabela 9- Medidas das amostras do aço SAE 1050 e SAE 4140 antes e após o tratamento térmico

	1050	4140
	Alteração na dimensão (%)	Alteração na dimensão (%)
A	-0,14	-0,02
B	2,15	-0,32
C	-0,91%	0,27
D	1,07	-0,21
E	-1,89	-0,62
F	-1,16	-0,99
G	-1,95	1,39

Fonte: autores (2023).

Após a medição das amostras tratadas e não tratadas, foi possível verificar que todas as dimensões sofreram alteração nas medidas de suas sessões, aumentando ou diminuindo.

Por se tratar de uma amostra com dois furos centrais, estes podem ser utilizados para verificar a distorção da peça. O foco do estudo foi então observar as medidas dos furos (medidas E e F) e o passo ou distância entre furos (medidas D) após o tratamento térmico.

É possível verificar que para amostra do aço SAE 1050, houve um aumento na distância entre furos e uma diminuição no diâmetro dos furos. O que sugere que houve, nestas sessões uma expansão nas medidas.

No aço SAE 4140, foi observado a diminuição das medidas das seções D, E e F, tendo a sessão F diminuído quase 1% do tamanho original. Nesta amostra, ocorreu um aumento na espessura (sessões G e C, respectivamente).

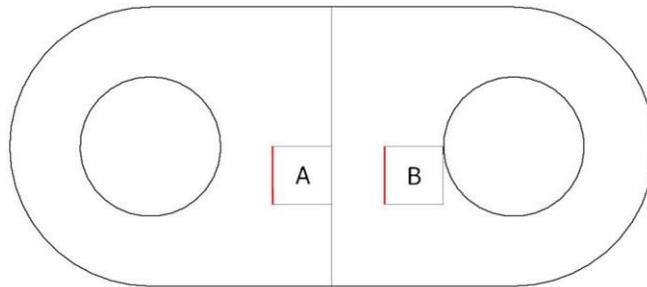
De forma a avaliar as distorções, foi realizada a análise metalográfica das amostras, com o intuito de observar a microestrutura formada.

4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Nas amostras do aço SAE 4140 e SAE 1050, após o tratamento térmico, foram retirados corpos de prova, com o intuito de observar a microestrutura de diferentes seções da peça.

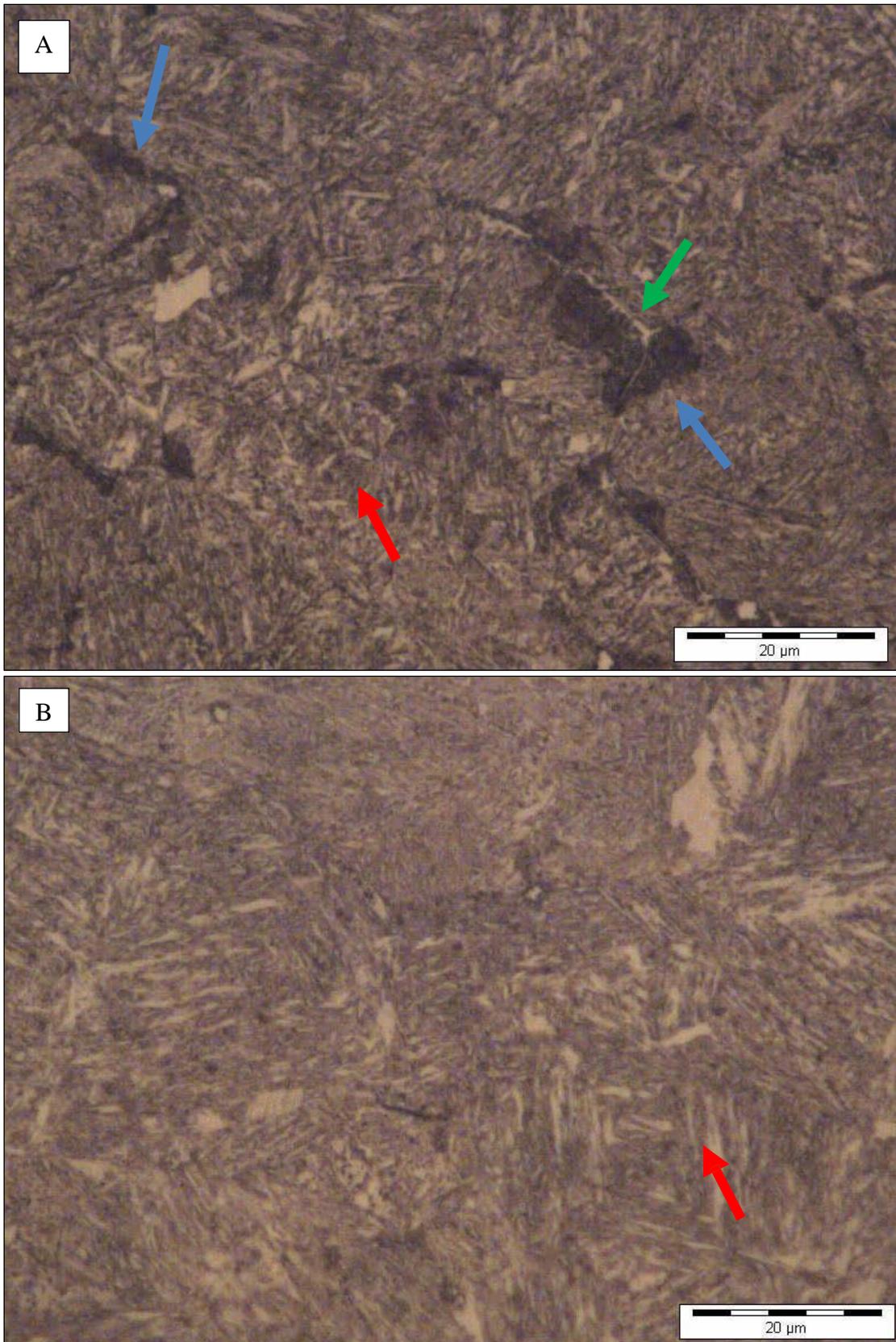
A fim de comparar o efeito do tratamento térmico na estrutura, foram analisadas amostras das seções A e B, referentes ao centro e próximo as área do furo, respectivamente, conforma apresentado na Figura 11.

Figura 11- Sessões das amostras analisadas via metalografia



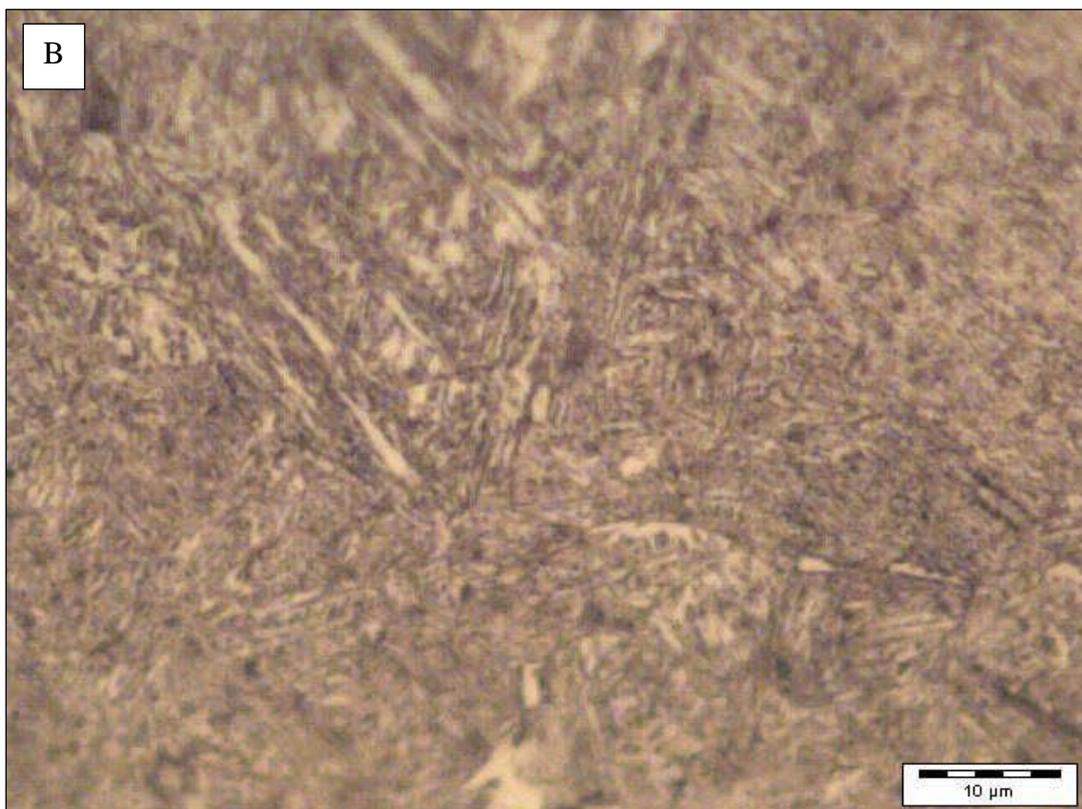
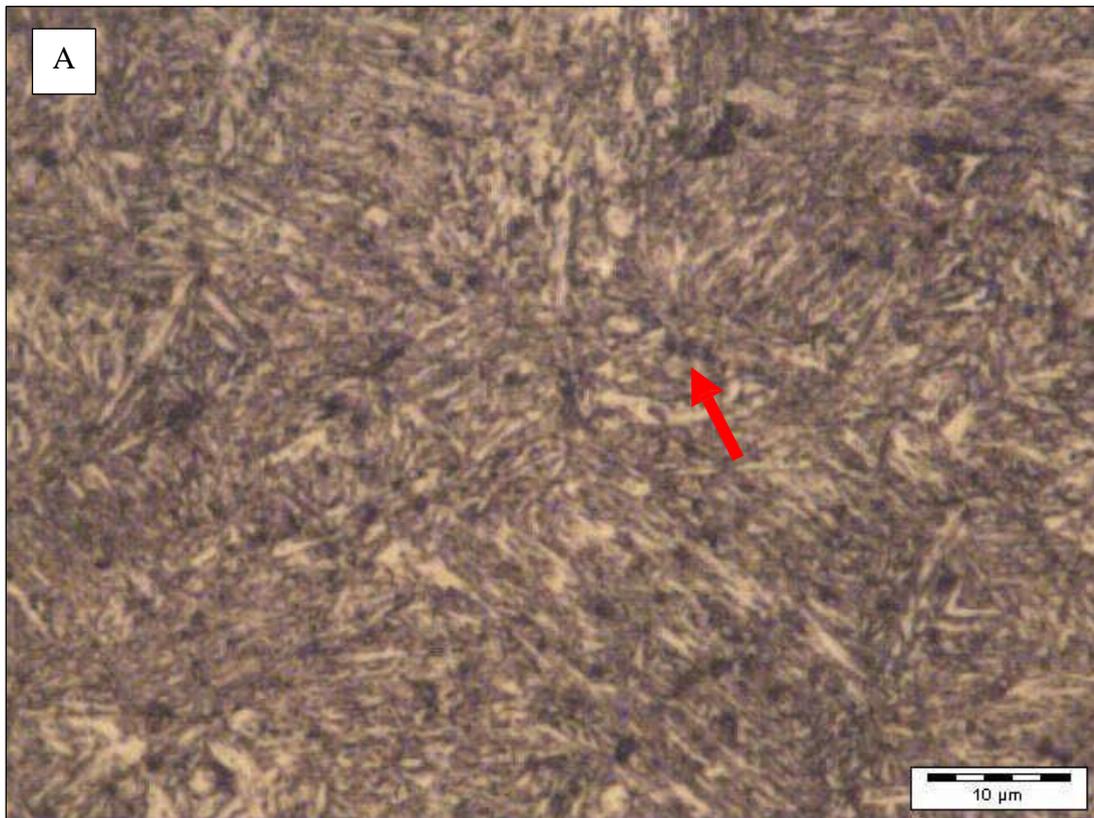
Na Figura 12 e 13 está apresentada a micrografia das amostras A e B do aço SAE 1050, com ampliação de 1000x.

Figura 12- Fotomicrografia do aço SAE 1050 da seção A - A) centro b) borda;



Fonte: autores (2023).

Figura 13-Fotomicrografia do aço SAE 1050 da seção B c)centro e d)borda



Fonte: autores (2023).

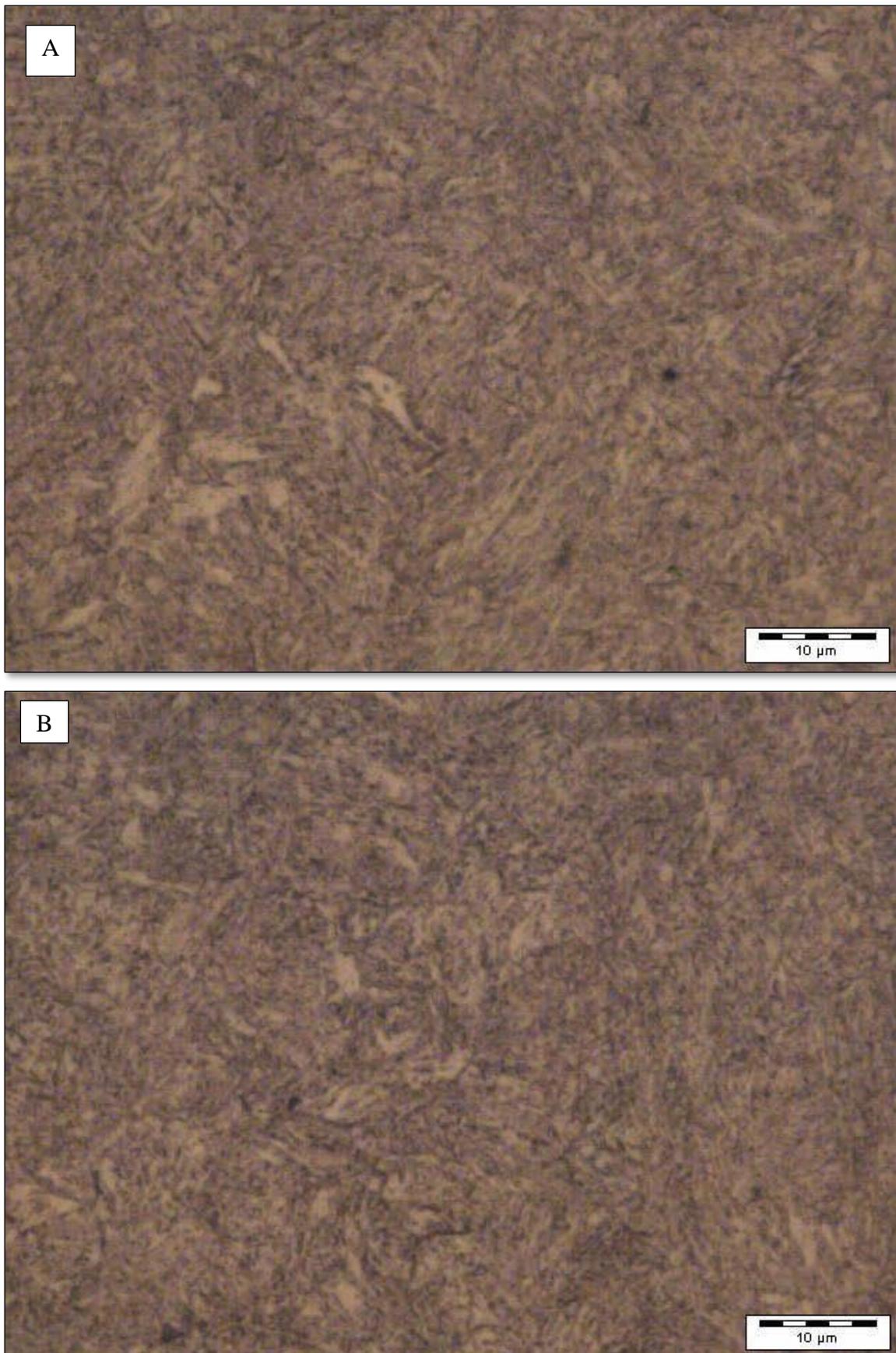
Como já dito anteriormente, as amostras das sessões A são referentes ao centro da amostra enquanto as amostras da sessão B são referentes a borda, próxima a região do furo.

Como pode ser visto, na Figura 12 (a) e (b), no centro da amostra é possível ver o surgimento de ferrita *Widmanstätten* (seta verde) e regiões com o aparecimento de perlita (estrutura de coloração mais escura, indicada pela seta azul) nas regiões de contorno da ferrita, além da estrutura martensítica (seta vermelha). O aparecimento das estruturas, além da martensita, se atribuiu ao fato de que, se tratando da região central da amostra, esta levou mais tempo que as demais para realizar a troca de calor com o líquido refrigerante.

Já nas amostras referentes as bordas do furo (Figura 13 (a) e (b), é visível o aparecimento predominante da estrutura martensítica A martensita é estrutura característica de aços submetidos ao resfriamento rápido, enquanto o aparecimento da ferrita se atribuiu a decarbonetização ocorrida no forno. Gamboni et al. (2020) analisou as microestruturas formadas a partir da têmpera do aço SAE 1050 resfriado em diferentes meios, como óleo de soja, óleo mineral, água, óleo de têmpera, óleo mineral ATF, água com gás e óleo mineral ISO. Em seus estudos, os autores observaram, para amostras resfriadas em óleo uma estrutura martensítica com presença da estrutura ferrítica, e uma mistura de bainita com perlita.

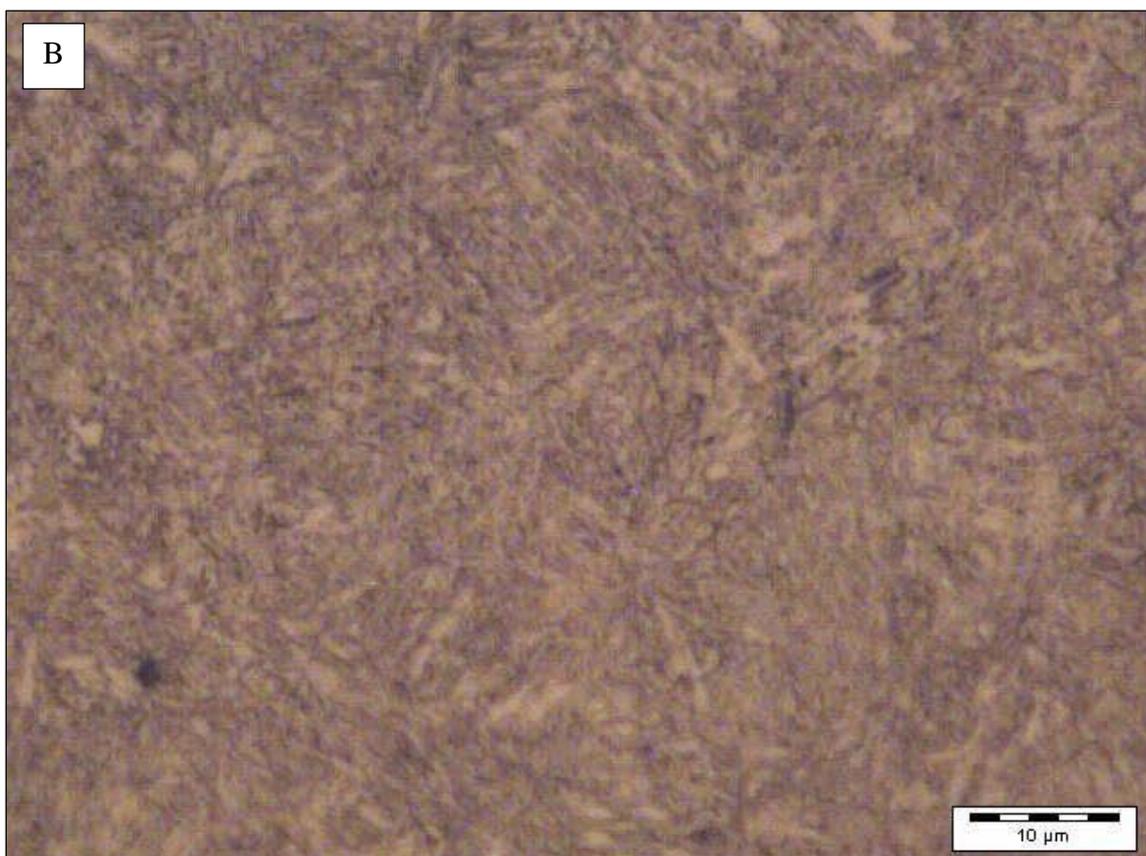
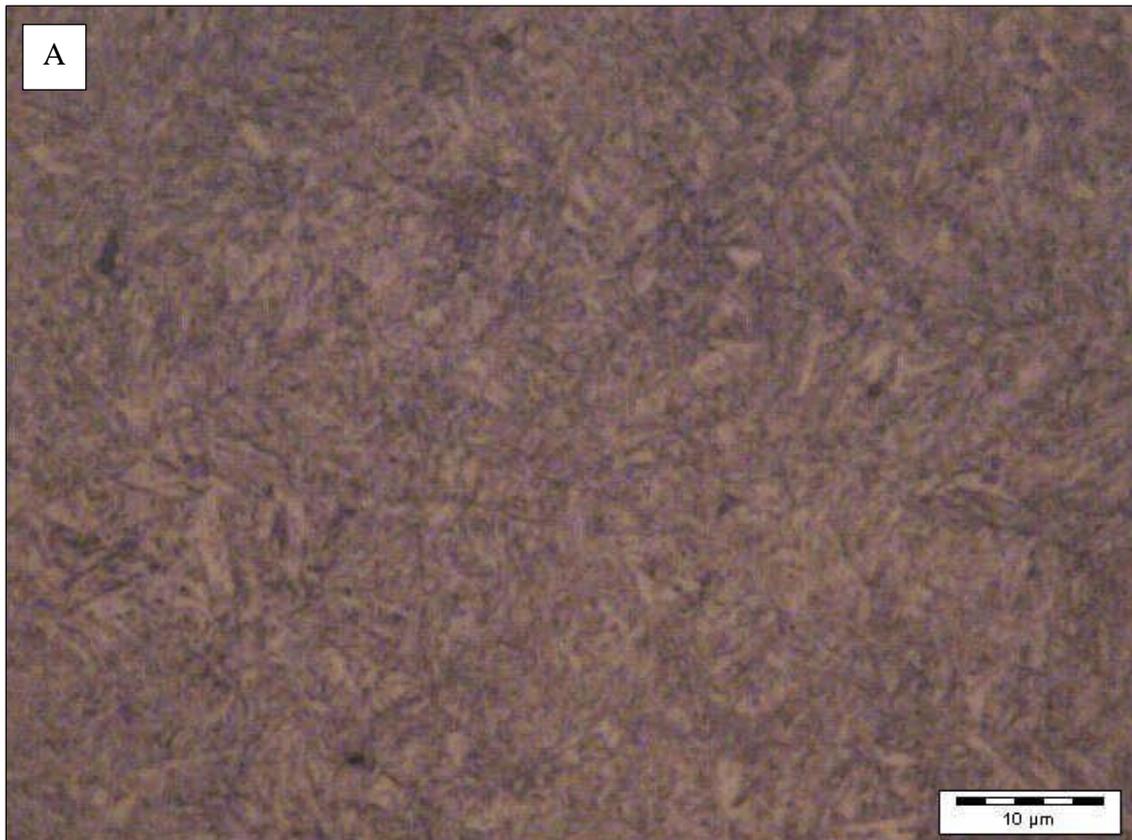
Na Figura 14 e 15 está apresentada a micrografia das amostras A e B do aço SAE 4140, com ampliação de 1000x.

Figura 14-Micrografia do aço SAE 4140 da sessão A- A) centro b) borda



Fonte: autores (2023).

Figura- 15 Micrografia do aço SAE 4140 da sessão B - A) centro b) borda;



Fonte: autores (2023).

Na microscopia do aço SAE 4140, foi verificado para as duas sessões nas regiões centrais (Figura 14- a) e Figura 15 a)) e de borda (Figura 14- b) e Figura 15 b)) uma estrutura predominantemente martensítica.

Kurt, Akyuz e Ergul (2023) realizaram um estudo, onde analisaram processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento para o aço SAE 4140, variando parâmetros do processo (temperatura e tempo) e meios de resfriamento (água e óleo-água) para ver como as amostras apresentam mudanças mecânicas sob várias condições. Neste trabalho, os autores observaram a presença predominante da estrutura martensítica após a têmpera do aço SAE 4140.

Segundo Meysami et al, (2010), devido a fatores como espessura da amostra e por se tratar de uma região central da peça, nessas áreas ocorre um atraso para transformação de austenita, fazendo com que ocorra a transformação ferrita-perlita ocorre dentro da microestrutura do aço.

Meysami e colaboradores (2010), realizaram a têmpera de tarugos laminados a quente de aço AISI 4140 com diferentes diâmetros (75, 80, 85, 100, 105 e 115 mm), com o intuito de avaliar o efeito do diâmetro das amostras nas propriedades e microestruturas do material. Os autores observaram que na superfície e interior da haste com 115 mm de diâmetro a estrutura superficial é martensita enquanto na estrutura interna podem ser encontradas martensita, bainita, ferrita e perlita. Porém, na haste com 70 mm de diâmetro, a superfície e a estrutura interna têm estrutura de martensita quase semelhante.

Nas medições, as amostras dos aços SAE 1050 apresentaram maior alteração nas medidas dos furos e distância entre furos, ou seja, maior distorção nestas regiões. Isto pode ser atribuído a presença de outras microestruturas além da martensita, o que pode ter causado um acúmulo de tensões.

No caso do aço SAE 4140, as amostras apresentaram uma diminuição nas três sessões analisadas e um aumento na espessura da amostra. Isso pode estar atribuído a expansão causada pela formação da estrutura martensítica.

5. CONCLUSÕES

Peças dos aços SAE 4140 e SAE 1050 foram tratados termicamente, por têmpera e revenimento, a fim de verificar a distorção causada nas peças pelo tratamento térmico utilizado.

Após finalizado o tratamento térmico de revenimento foi aferida a dureza de ambas as amostras. Foi verificado que no aço SAE 1050, houve uma maior dureza no centro da amostra quando comparada as regiões de borda. No caso do aço SAE 4140, resultado oposto foi encontrado, apresentando uma maior dureza nas bordas. Ainda, foi verificado que o aço SAE 1050 apresentou maiores valores de dureza que o aço SAE 4140 após o tratamento térmico.

Por meio das medições das sessões das amostras, foi verificado que o aço SAE 1050 apresentou uma maior distorção, quando comparada ao aço SAE 4140, já que este apresentou diminuição no diâmetro dos furos e aumento da distância entre eles.

Na metalografia, foi visto que a amostra do aço SAE 4140 apresenta estrutura majoritariamente martensítica, responsável pela expansão na espessura da amostra. Observou-se também que a microestrutura do aço SAE 1050 é composta por outras fases além da martensita (ferrita e perlita), o que pode ser responsável pela maior distorção na amostra.

Conclui-se que, apesar do aço SAE 4140 apresentar estrutura martensítica predominante, a amostra do aço SAE 1050 apresentou maior distorção após o tratamento térmico.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, LUIGI. L. M. **Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas de Aço AISI 5160 submetidos à Têmpera Convencional e Têmpera intensiva.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, 2012;
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 87:2000- Aço Carbono e Ligados para Construção Mecânica: Designação e Composição Química. Rio de Janeiro. 2000.
- ASM HANDBOOK. Heat Treating. Estados Unidos: ASM International, v. 4, 1991.
- BARREIRO, J. A. Tratamientos Térmicos de Los Aceros. 8 ed. Madri. Espanha: Editorial Dossat, 1985;
- BERRAHMOUNE, M. R. **Transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austénitique instable 301LN.** Tese de Doutorado – Doctorat Mécanique et Matériaux, ENSAM, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006;
- BORTOLETO, E. M. **Modelamento Numérico Computacional das Transformações de fase nos Tratamentos Térmicos de Aços.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010;
- CARVALHO, T.U.S. **caracterização do aço sae-4140 temperado em Água, salmoura e óleo e, posteriormente, revenido.** 70º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentos da Engenharia de Materiais: uma abordagem integrada. LCT Ltda. Ed 4, 2012.
- CHANDLER, H. Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels. ASM International; 2nd edition, 904 p. 1994.
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7ª. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- FECHTE-HEINEN, R. et al. **Quenching and Distortion.** HTM J. Heat Treatm. Mat. 76 (2021) 6.
- GAMBONI, O. C.; et al. **Análise microestrutural e de dureza do aço sae 1050 após procedimento de têmpera utilizando diferentes fluidos de resfriamento.** Faculdade de Tecnologia Deputado Waldyr Alceu Trigo de Sertãozinho (Fatec-Stz), São Paulo, 2020. DOI: 10.33635/sitefa.v3i1.142.
- HUALLPA, E. A. **Caracterização da transformação martensítica em temperaturas criogênicas.** Dissertação (mestrado em Engenharia). Escola politécnica da universidade de são Paula. São Paulo. 2011.
- JUNIOR, R. P. S. et al. **Têmpera de aço sae 1045 utilizando diferentes meios de**

resfriamento. 71º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

KURT, H.I., AKYUZ, U.B., ERGUL, E., Mechanical changes and analysis of heat-treated 4140 steel with Taguchi method and ANOVA, **The International Journal of Materials and Engineering Technology (TIJMET)**, 2023, 6(1): 1-6

MACHADO, D. S.; LOUZADA, G. G. **Análise de dureza dos aços aisi 4140 e aisi 4340 submetidos as mesmas condições de têmpera e revenimento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica.), Instituto Federal do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, 2022.

MEYSAMI, A. H.; et al. An investigation on the microstructure and mechanical Properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel. **Materials and Design**, v .31, p. 1570–1575. 2010.

MULYADI, M. et al. The Effect of Quenching Media on the Hardness of AISI 1045 Steel. **Atlantis Highlights in Engineering**, v. 9, 2021.

OLIVEIRA, C. S.; DENTI, G. B. **Avaliação da tenacidade ao impacto da região revenida pelo passe duplo em soldagem smaw do aço aisi 1045.** Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

PUHL, L. A. R. **Influência dos parâmetros de temperatura e resfriamento de têmpera em aço sae 4140.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. GUARAPUAVA. 2017.

RASMA, E. T. **Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 Tratado sob Diferentes Tratamentos Térmicos.** Dissertação de Mestrado (Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF. Campos dos Goytacazes. 2015.

SILVA, A. O. **Influência de diversos tratamentos térmicos na Microestrutura e dureza do aço 1045.** Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2021.

SINGH, S. et al. Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel. **Materials Today: Proceedings**, 45, 5097–5101. (2021).

SINGH, H.; SINGH, A. An Enhancement of Properties of Material SAE 1045 Steel. **Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)**. Vol-3, Issue-2, 2017.

VILLA, M. **Isothermal Martensite Formation.** Tese. Technical University of Denmark (DTU). Lyngby, 2013.