



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOSANE ASSUNÇÃO CORREIA DO NASCIMENTO

**APRIMORAMENTO DO SEMIEIXO VAZADO DE UM PROTÓTIPO BAJA
SAE ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO
SAE 4130**

RECIFE
2025

JOSANE ASSUNÇÃO CORREIA DO NASCIMENTO

**APRIMORAMENTO DO SEMIEIXO VAZADO DE UM PROTÓTIPO BAJA
SAE ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO
SAE 4130**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira

RECIFE
2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE**

Nascimento, Josane Assunção Correia do.

Aprimoramento do semieixo vazado de um protótipo Baja SAE através da modificação das propriedades mecânicas do aço SAE 4130 / Josane Assunção Correia do Nascimento. - Recife, 2025.

67 p. : il., tab.

Orientador(a): Carlos Augusto do Nascimento Oliveira
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, anexos.

1. Aço SAE 4130. 2. Tratamentos Térmicos. 3. Propriedades mecânicas. 4. Microestrutura. 5. Baja SAE. I. Oliveira , Carlos Augusto do Nascimento . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOSANE ASSUNÇÃO CORREIA DO NASCIMENTO

**APRIMORAMENTO DO SEMIEIXO VAZADO DE UM PROTÓTIPO BAJA
SAE ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO
SAE 4130**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 05/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Msc. Adson Beserra da Silva
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rogério Pontes de Araujo
Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Jozeane, por seu apoio incondicional e por priorizar, junto comigo, a conclusão deste trabalho, especialmente nos dias em que precisei estar na universidade para os procedimentos experimentais, e no tempo que dediquei o projeto Mangue Baja.

À minha família que me apoiaram constantemente: meu pai José Luiz, meu irmão Jonas, minha avó Zélia e minha tia Jozélia, meus tios Jair, Gilson e Jurandir. Ao meu companheiro Helton, pelo carinho, paciência e incentivo em todos os momentos.

A Wagner Gomes, pelo suporte essencial durante as fases finais e mais difíceis deste projeto. A Lorena e Remisson, que me incentivaram a priorizar este trabalho e a persistir diante dos obstáculos.

À Universidade Federal de Pernambuco e aos professores que compartilharam seus conhecimentos. Agradeço especialmente ao professor Carlos Augusto pela orientação técnica e pelos conselhos que foram fundamentais para este trabalho.

Aos técnicos de laboratório Rubens e Ivaldo, cuja colaboração foi indispensável. Esta experiência reforçou que grandes realizações são fruto de trabalho coletivo.

À equipe Mangue Baja, onde amadureci, desenvolvi resiliência e aprendi sobre dedicação e trabalho em equipe.

À equipe de Engenharia Virtual da Stellantis, pelo suporte e compreensão durante este período. Agradeço especialmente a Rafael Átila, Eduardo Falcetti, Thiago Borgatti, Alex Silva, Isabela Chaves, Camilla Francielle, Hugo Correia, Vagner Abramchuk, Giovanni Luidge, Bruno Erzinger e Thiago Saúde.

E a todos que contribuíram para que este momento fosse possível.

RESUMO

Durante o desenvolvimento do semieixo vazado pela equipe Mangue Baja, identificou-se a zona estriada do protótipo de semieixo como uma das regiões mais críticas, apresentando escoamento caracterizado pelo acúmulo de tensões. Este trabalho teve como objetivo aprimorar as propriedades mecânicas do aço SAE 4130 por meio de tratamentos térmicos, visando aumentar a vida útil de um semieixo vazado e melhorar a eficiência do sistema de transmissão de um veículo Baja SAE. Foram realizados quatro conjuntos de tratamentos térmicos para avaliar sua influência sobre este aço hipoeutetóide com presença de elementos de liga. A Amostra 1 foi mantida sem tratamento térmico, servindo como referência. A Amostra 2 foi submetida à têmpera em água, enquanto a Amostra 3 recebeu têmpera em água seguida de revenimento a 540°C. As Amostras 4 e 5 foram temperadas em óleo, sendo que a Amostra 5 também passou por revenimento a 425°C. Os ensaios de tração revelaram que as amostras submetidas apenas à têmpera (Amostras 2 e 4) resultaram altos valores de resistência ao escoamento, porém com baixa deformação, caracterizando comportamento frágil. A Amostra 3 demonstrou a maior reprodutibilidade dos resultados e resistência ao escoamento média de 914 MPa, representando aumento de 54% em relação à amostra de referência. A Amostra 5 atingiu os maiores valores de resistência ao escoamento, com 1120 MPa, correspondendo a um aumento de 89%. Os ensaios de dureza, realizados após preparação metalográfica, evidenciaram a influência do revenimento em cada conjunto de tratamentos. A Amostra 3 (têmpera em água + revenimento a 540°C) teve sua dureza reduzida de 51 HRC para 31 HRC. Já a Amostra 5 (têmpera em óleo + revenimento) apresentou redução menos acentuada, passando de 41 HRC para 39 HRC, provavelmente devido à temperatura de revenimento ter sido mais baixa, de 425°C. A análise por microscopia óptica permitiu observar as microestruturas resultantes de cada tratamento, validando os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e confirmando a correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Aço SAE 4130; Tratamentos Térmicos; Propriedades mecânicas; Microestrutura; Baja SAE;

ABSTRACT

During the development of the hollow half-shaft by the Mangue Baja team, the splined zone of the half-shaft prototype was identified as one of the most critical regions, presenting yielding characterized by stress concentration. This work aimed to improve the mechanical properties of SAE 4130 steel through heat treatments, seeking to increase the service life of a hollow half-shaft and enhance the transmission system efficiency of a Baja SAE vehicle. Four sets of heat treatments were performed to evaluate their influence on this hypoeutectoid steel with alloying elements. Sample 1 was kept without heat treatment, serving as a reference. Sample 2 was subjected to water quenching, while Sample 3 received water quenching followed by tempering at 540°C. Samples 4 and 5 were oil quenched, with Sample 5 also undergoing tempering at 425°C. Tensile tests revealed that samples subjected only to quenching (Samples 2 and 4) resulted in high yield strength values but with low deformation, characterizing brittle behavior. Sample 3 demonstrated the highest reproducibility of results and an average yield strength of 914 MPa, representing a 54% increase compared to the reference sample. Sample 5 achieved the highest yield strength values at 1120 MPa, corresponding to an 89% increase. Hardness tests, performed after metallographic preparation, evidenced the influence of tempering in each treatment set. Sample 3 (water quenching + tempering at 540°C) had its hardness reduced from 51 HRC to 31 HRC. Sample 5 (oil quenching + tempering) showed a less pronounced reduction, from 41 HRC to 39 HRC, probably due to the lower tempering temperature of 425°C. Optical microscopy analysis allowed observation of the microstructures resulting from each treatment, validating the results obtained in mechanical tests and confirming the correlation between microstructure and mechanical properties.

Keywords: **SAE 4130 Steel; Heat Treatments; Mechanical Properties; Microstructure; Baja SAE.**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Resultado do ensaio de Jominy para o aço SAE 4130.	18
Figura 2: Resultado do ensaio de Jominy para o aço SAE 1019.	18
Figura 3: Exemplo de diagrama tensão-deformação, e seus pontos específicos.	19
Figura 4: Região elástica do diagrama tensão-deformação.	20
Figura 5: Formas de obtenção da tensão de escoamento.	21
Figura 6: Exemplos de diferentes estruturas cristalinas, da esquerda para direita: cúbica de corpo centrado, cúbica de face centrada, hexagonal simples.	24
Figura 7: Formação da perlita a partir da austenita.	26
Figura 8: Formação da martensita.	27
Figura 9: Morfologia da bainita superior e inferior e o processo de formação.	27
Figura 10: Diagrama Ferro-Carbono.	28
Figura 11: Diagrama TTT para o aço SAE 4130.	30
Figura 12: Fluxograma dos procedimentos realizados neste trabalho.	31
Figura 13: Usinagem dos corpos de prova no torno CNC.	34
Figura 14: Conjunto de corpos de prova.	35
Figura 15: Esquemático do corpo de prova para o ensaio de tração.	35
Figura 16: Preparação dos corpos de prova para a realização do tratamento térmico.	36
Figura 17: Representação do experimento.	37
Figura 18: Fixação do corpo de prova com o extensômetro acoplado.	38
Figura 19: Durômetro Rockwell Mitutoyo HR-400.	39
Figura 20: Localização dos pontos de medição do ensaio de dureza no corpo de prova.	40
Figura 21: Struers Citopress-30.	41
Figura 22: Microscópio óptico Zeiss Lab A1 AX10.	43
Figura 23: Corpos de prova fraturados após ensaio de tração.	45
Figura 24: Curvas de tensão x deformação para cada conjunto de amostras.	46
Figura 25: Boxplot dos resultados do ensaio de tração para as principais propriedades mecânicas.	48
Figura 26: Distribuição dos resultados do ensaio de dureza na escala HRC.	52

Figura 27: Relações entre a dureza e o limite de resistência à tração.....	53
Figura 28: Micrografias da Amostra 1, padrão, em diversos aumentos	55
Figura 29: Micrografias da Amostra 2, têmpera em água, em diversos aumentos....	56
Figura 30: Micrografias da Amostra 3, têmpera em água e revestimento, em diversos aumentos.....	57
Figura 31: Micrografias da Amostra 4, têmpera em óleo, em diversos aumentos.....	59
Figura 32: Micrografias da Amostra 5, têmpera em óleo e revestimento, em diversos aumentos.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição aço SAE 4130, segundo a norma SAE J404.....	15
Tabela 2: Composição aço SAE 4130 utilizado, valores em porcentagem %.	32
Tabela 3: Definição dos tratamentos térmicos a serem realizados.	33
Tabela 4: Dimensões dos corpos de prova segundo a ASTM E8/E8M, Specimen 2.	
.....	35
Tabela 5: Resultados do ensaio de tração.	47
Tabela 6: Valores médios obtidos no ensaio de tração.	48
Tabela 7: Resultados obtidos através do ensaio de dureza.....	51
Tabela 8: Durezas convertidas para a escala Rockwell C.	51
Tabela 9: Média e desvio padrão para o resultado do ensaio de dureza.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	AÇO SAE 4130.....	15
2.1.1	Caracterização	15
2.2	PROPRIEDADES	19
2.2.1	Módulo de elasticidade.....	19
2.2.2	Resistência ao escoamento	20
2.2.3	Limite de resistência à tração.....	21
2.2.4	Alongamento/ Deformação específica.....	22
2.2.5	Dureza.....	22
2.3	DIAGRAMAS DE FASE	23
2.3.1	Microestruturas do Aço	24
2.3.2	Diagrama Ferro-Carbono	28
2.3.3	Diagrama TTT/ TRC.....	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	MATERIAL	31
3.2	SELEÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS	32
3.3	CORPO DE PROVA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO	34
3.4	TRATAMENTO TÉRMICO.....	36
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS	37
3.5.1	Ensaio de tração	38
3.5.2	Ensaio de dureza Rockwell	38
3.6	METALOGRAFIA.....	40
3.6.1	Corte	40
3.6.2	Embutimento	41
3.6.3	Lixamento e polimento	41
3.6.4	Ataque químico	42
3.6.5	Análise metalográfica	42
4	RESULTADOS	44

4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	44
4.2	ENSAIO DE DUREZA.....	50
4.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA	54
4.3.1	Amostra 1 - Padrão	54
4.3.2	Amostra 2 - Têmpera em Água (TA)	55
4.3.3	Amostra 3 - Têmpera em Água + Revenimento 540°C (TAR).....	56
4.3.4	Amostra 4 - Têmpera em Óleo (TO).....	58
4.3.5	Amostra 5 - Têmpera em Óleo + Revenimento 425°C (TOR).....	59
5	CONCLUSÃO.....	61
6	ANEXOS	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1 INTRODUÇÃO

A SAE BRASIL (*SAE, Society of Automobile Engineers*) promove anualmente a competição Baja SAE, um desafio que envolve estudantes de engenharia no projeto e construção de um veículo monoposto off-road. O regulamento estabelece que o protótipo deve ser viável para produção em série de 4000 unidades por ano, atendendo a critérios específicos de conformidade e utilizando obrigatoriamente um motor Briggs & Stratton de 10 hp, sem modificações que alterem sua potência. Os veículos são avaliados em provas de aceleração, velocidade máxima, manobrabilidade e resistência em condições off-road através da prova de enduro (SAE BRASIL, 2023). Cada equipe desenvolve soluções para o desafio, para os diversos sistemas do veículo, incluindo o sistema de transmissão.

Para o protótipo desenvolvido pela equipe Mangue Baja, da Universidade Federal de Pernambuco, propõe-se a fabricação de um semieixo vazado de aço SAE 4130, em substituição ao semieixo atual de aço SAE 4340 maciço, visando redução de massa e, consequentemente, melhor desempenho do veículo. Em testes preliminares realizados pela equipe no ano de 2019, identificou-se a zona estriada do semieixo como região mais crítica, com escoamento caracterizado pelo acúmulo de tensões. De acordo com Norton (2013), o dimensionamento de estrias depende de parâmetros como torque aplicado, comprimento da estria, diâmetro primitivo e tensão de cisalhamento admissível. Considerando que a tensão de cisalhamento é um dos fatores determinantes no dimensionamento, torna-se fundamental compreender sua relação com as propriedades do material. Budynas e Nisbett (2016) destacam que, segundo a teoria de falha para materiais dúcteis, é possível relacionar a tensão máxima de cisalhamento diretamente com a resistência ao escoamento do material.

Para minimizar o problema identificado, torna-se necessário aprimorar as propriedades mecânicas do componente, aumentando sua resistência ao escoamento e reduzindo o acúmulo de tensões. Conforme Colpaert (2008), uma das formas mais eficazes de alterar propriedades mecânicas é através de tratamentos térmicos, que podem ser convencionais (envolvendo mudanças na microestrutura por meio de aquecimento e resfriamento controlados) ou não convencionais (relacionados a alterações químicas na superfície da peça). Dentre essas abordagens, os tratamentos

térmicos convencionais se destacam por sua capacidade de promover transformações estruturais em todo o volume do material. Os tratamentos térmicos convencionais permitem modificar a microestrutura, a energia das ligações químicas e, consequentemente, a energia interna do material, resultando em alterações significativas em suas propriedades mecânicas.

Embora um projeto de semieixo envolva diversas etapas, como dimensionamento de estrias e chavetas, além de análise numérica por elementos finitos, este trabalho delimita seu escopo à melhoria das propriedades mecânicas através de tratamentos térmicos convencionais. Neste contexto, o presente trabalho busca aprimorar o projeto do semieixo vazado em aço SAE 4130, modificando suas propriedades mecânicas por meio de tratamentos térmicos envolvendo têmpera seguida de revenimento em diferentes meios de resfriamento. Serão realizados ensaios experimentais para comparar as propriedades mecânicas obtidas e avaliar a microestrutura resultante, validando os resultados e indicando quais tratamentos térmicos são mais adequados para a fabricação deste componente. A partir deste estudo, espera-se que este estudo contribua para a redução de peso no protótipo da equipe Mangue Baja, aumentando sua eficiência e desempenho na competição Baja SAE.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é aprimorar as propriedades mecânicas do aço SAE 4130, por meio de tratamentos térmicos, para aumentar o desempenho e a vida útil de um semieixo vazado aplicado em veículos Baja SAE.

Como objetivos específicos podem-se citar:

- Determinar as propriedades mecânicas críticas a serem aprimoradas no aço SAE 4130, e selecionar os tratamentos térmicos mais adequados para isso.
- Realizar tratamentos térmicos no aço SAE 4130, variando parâmetros de temperatura, taxa de resfriamento e revenimento.
- Caracterizar as amostras tratadas por meio de ensaios mecânicos, como ensaio de dureza e ensaio de tração, e sua microestrutura através de microscopia óptica.

- Determinar a combinação de parâmetros que resulte na melhor relação entre resistência ao escoamento e tenacidade para a aplicação prática em veículos Baja SAE.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AÇO SAE 4130

O aço SAE 4130 é um aço especial que atende por essa nomenclatura devido ao carbono ser ligado ao cromo-níquel-molibdênio. Largamente utilizado na indústria petrolífera e aeronáutica, o aço SAE 4130 apresenta, devido à sua composição, propriedades mecânicas elevadas no quesito temperabilidade, corrosão, e resistência ao impacto (Callister; Rethwisch, 2016).

A norma SAE J404 determina o intervalo de composição dos elementos de aços ligados. O aço SAE 4130 tem sua composição presente na Tabela 1, sendo os elementos de liga predominantes: Cromo, Manganês, Molibdênio e Silício (SAE J404, 2009).

Tabela 1: Composição aço SAE 4130, segundo a norma SAE J404.

	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Mo	% P	% S	% Cu	% Ni	% Al
Norma SAE J404	0,28 - 0,33	0,40 - 0,60	0,15 - 0,35	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	Máx. 0,035	Máx. 0,040	-	-	-

Fonte: Adaptado de SAE J404 (2009);

A composição do aço influencia diretamente sua microestrutura, o arranjo atômico e a energia de ligação, o que, por sua vez, determina suas propriedades mecânicas. Essas propriedades são cruciais para a caracterização do material, nos quesitos soldabilidade e temperabilidade.

2.1.1 Caracterização

A caracterização do material é fundamental para determinar quais são as limitações com relação ao projeto de fabricação do semieixo vazado.

2.1.1.1 Soldabilidade

A capacidade de um aço ser soldado é influenciado pela sua composição, sendo importante a quantidade de carbono e presença de elementos de liga. No caso do aço SAE 4130, a quantidade de carbono varia entre 0,28% e 0,33% apresentando um teor de carbono relativamente baixo, o que contribui para uma boa soldabilidade. No entanto, os elementos de liga presentes no aço SAE 4130, aumentam a dureza do material, e segundo ASM Handbook Committee (1990) a dureza é um importante indicador de soldabilidade.

Tradicionalmente, equações empíricas têm sido desenvolvidas experimentalmente para expressar a soldabilidade. Marques e Modenesi (2011), afirmam que a suscetibilidade à fissuração e ao aparecimento de trincas pode ser estimada através do cálculo do carbono equivalente. Esse método é importante para determinar se o aço necessita de tratamento térmico pré e pós-soldagem. A equação do carbono equivalente para o Instituto Internacional de Soldagem (IIW, do inglês *International Institute of Welding*) é calculada pela Equação (1):

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

onde: C_{eq} = carbono equivalente;

C = quantidade de carbono, percentual;

Mn = quantidade de manganês, percentual;

Cr = quantidade de cromo, percentual;

Mo = quantidade de molibdênio, percentual;

V = quantidade de vanádio, percentual;

Ni = quantidade de níquel, percentual;

Cu = quantidade de cobre, percentual;

Segundo ASM Handbook Committee (1990), quando o $C_{eq} < 0,45$ o material é considerado pouco sensível à fissuração e não é necessário a realização de tratamentos térmicos para a realização da soldagem. Quando o $C_{eq} > 0,60$ o material

apresenta dureza elevada e deve passar pelos processos de pré-aquecimento e pós-soldagem, a fim de evitar dureza excessiva e trincas na Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Quando C_{eq} atinge valores intermediários somente o pré-aquecimento se torna necessário.

No caso no SAE 4130, considerando a sua composição o $C_{eq} = 0,645$ sendo assim recomendado o pré-aquecimento (geralmente entre 150°C e 370°C) e tratamento térmico pós soldagem para alívio das tensões térmicas. A temperabilidade está relacionada ao carbono equivalente, e quanto maior o carbono equivalente maior a temperabilidade e a dureza do material.

2.1.1.2 Temperabilidade

Temperabilidade é a capacidade de um aço em formar martensita quando submetido ao tratamento térmico de têmpera, onde o aço é resfriado rapidamente a partir da fase austenítica (Callister; Rethwisch, 2016). Esse conceito é essencial porque a martensita é uma microestrutura que proporciona alta dureza e resistência ao aço.

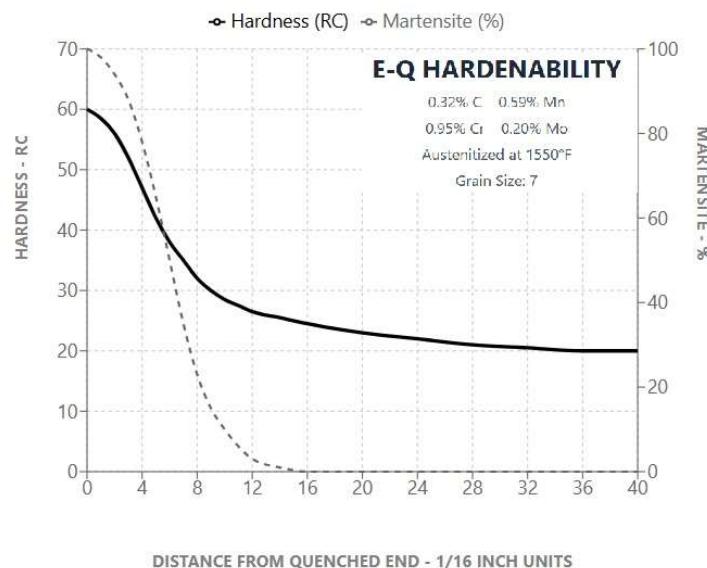
Cada material apresenta um comportamento distinto na formação de martensita, e esse comportamento pode ser avaliado através do Ensaio de Jominy. Esse ensaio permite determinar a relação entre dureza obtida após a têmpera e a distância do ponto de medição a uma fonte de resfriamento, onde menores distâncias apresentam uma maior taxa de resfriamento.

À medida que a taxa de resfriamento diminui, a formação de martensita e a dureza também diminuem. Com uma taxa de resfriamento mais lenta, há mais tempo disponível para a difusão do carbono, resultando na formação de uma maior proporção de perlita, que apresenta menor dureza, e pode estar misturada com a martensita e a bainita.

O aço SAE 4130 apresenta uma boa temperabilidade, sendo possível observar ao comparar com o aço SAE 1019. No ensaio de Jominy, ilustrado na Figura 1, observa-se que a dureza máxima alcançada pelo aço SAE 4130 é de 50 HRC, enquanto o aço 1019 atinge apenas 30 HRC, presente na Figura 2. Essa diferença se

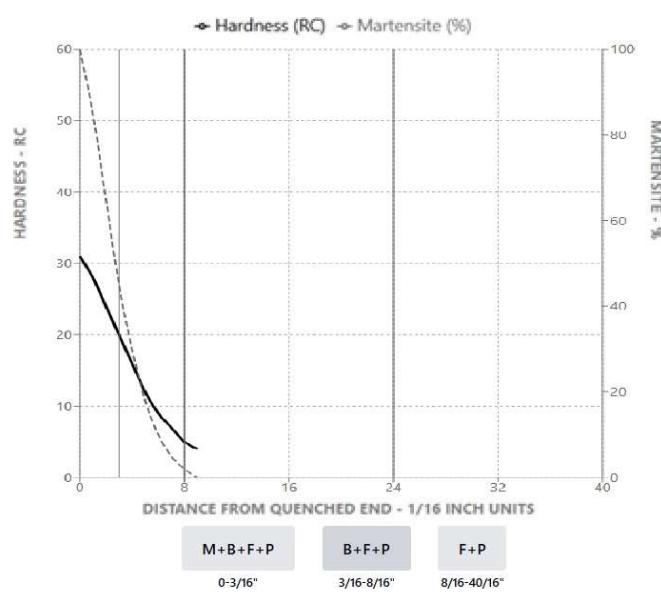
dá devido à presença do cromo e do molibdênio, que retardam a transformação da austenita em fases mais macias durante o resfriamento, permitindo a formação de martensita em uma maior profundidade.

Figura 1: Resultado do ensaio de Jominy para o aço SAE 4130.



Fonte: Adaptado de Research Laboratory (1951).

Figura 2: Resultado do ensaio de Jominy para o aço SAE 1019.



Fonte: Adaptado de Research Laboratory (1951).

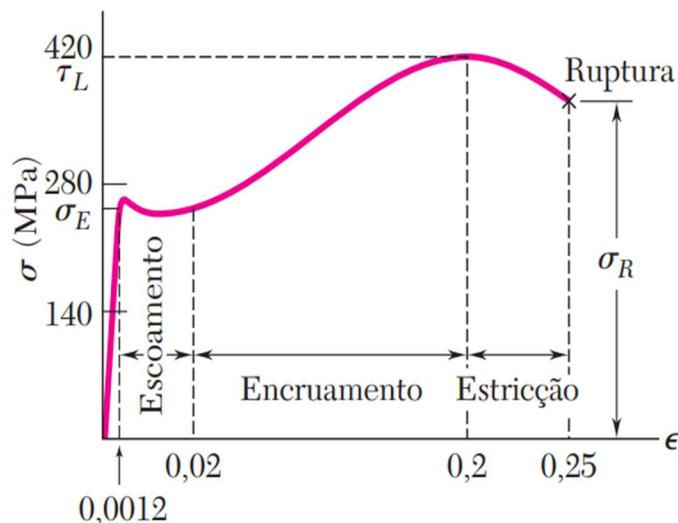
2.2 PROPRIEDADES

Da perspectiva da engenharia, a caracterização fundamental de um material é realizada por meio de suas propriedades. Estas propriedades são cruciais para o dimensionamento de projetos e determinação das cargas admissíveis. As propriedades mecânicas, como o limite de escoamento, o módulo de resistência e a tensão última, são especialmente relevantes para compreender o comportamento de um material sob a influência de cargas específicas. Nos próximos tópicos, serão discutidas a definição e a importância de cada uma dessas propriedades.

2.2.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é a relação entre a tensão e a deformação. É a taxa com que o material consegue deformar à medida que recebe uma carga, e consequentemente tensão. Após a realização de um ensaio de tração, demonstrado na Figura 3, é possível observar comportamentos distintos no corpo de prova, entre eles as regiões: elástica, de escoamento, de encruamento, de estrição e o ponto de ruptura.

Figura 3: Exemplo de diagrama tensão-deformação, e seus pontos específicos.



Fonte: Adaptado de Beer et al. (2011).

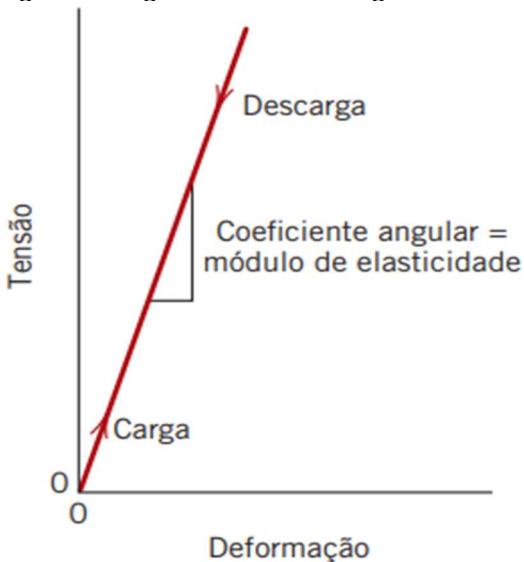
A zona elástica é restringida pelo limite de proporcionalidade do material, σ_E . Nessa região, a tensão é diretamente proporcional à deformação específica (Beer et al., 2011), e a constante de proporcionalidade é chamada de módulo de Young ou ainda, módulo de elasticidade, sendo representado pela letra E. Essa relação é chamada de lei de Hooke, e está descrita na equação (2).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2)$$

onde: E = módulo de elasticidade;
 ϵ = deformação específica;
 σ = tensão;

O módulo de elasticidade também pode ser determinado pela tangente da curva tensão-deformação, como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Região elástica do diagrama tensão-deformação.



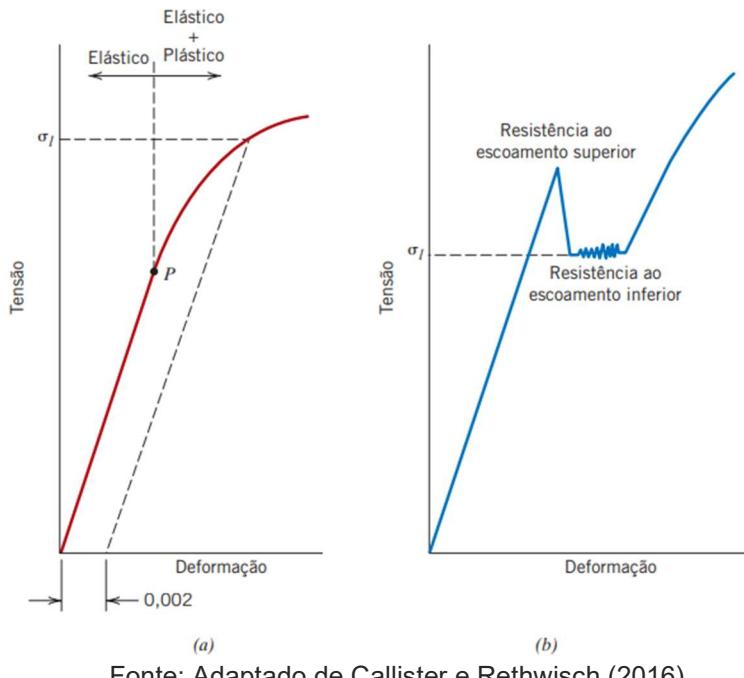
Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

2.2.2 Resistência ao escoamento

A resistência ao escoamento é a propriedade mecânica que determina a tensão máxima que o material é capaz de suportar até que comece a sofrer

deformações permanentes. Na curva tensão-deformação, o ponto de escoamento separa as regiões elástica e plástica. Alguns materiais exibem um comportamento com patamar de escoamento bem definido, apresentando uma resistência ao escoamento inferior e uma resistência ao escoamento superior, como mostrado na Figura 5(b). Quando o escoamento não ocorre de forma abrupta, é comum que a determinação desse ponto seja realizada através do método offset, construindo-se uma linha paralela à porção elástica da curva tensão-deformação a partir do ponto em que a deformação específica é igual a 0,002 (Callister; Rethwisch, 2016), como mostra a Figura 5(a).

Figura 5: Formas de obtenção da tensão de escoamento.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

2.2.3 Limite de resistência à tração

O limite de resistência à tração é determinado pela tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação. Esse ponto separa as regiões de encruamento e estrição. A partir dessa região é possível observar o fenômeno de estrição, onde

aparece uma pequena constrição no corpo de prova. Em um determinado modelo, se a tensão de resistência a tração for aplicada e mantida, ocorrerá a fratura.

2.2.4 Alongamento/ Deformação específica

O alongamento, ou deformação específica, é um parâmetro que classifica um material quanto a sua capacidade de deformar plasticamente até que ocorra a fratura. O alongamento ($\% \Delta L$), calculado pela equação (3), é obtido através da realização de um teste de tração, onde são comparados um comprimento inicial, l_0 , de referência, e o comprimento do momento da fratura, l_f .

$$\% \Delta L = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

onde: $\% \Delta L$ = alongamento;

l_0 = comprimento inicial de referência;

l_f = comprimento no momento da fratura;

Materiais que sofrem pouca ou nenhuma deformação plástica até a fratura são denominados de frágeis, enquanto materiais que apresentam uma maior capacidade de deformação até a fratura são chamados de dúcteis. Segundo Budynas e Nisbett (2016), materiais dúcteis apresentam alongamento maior ou igual a 5%.

2.2.5 Dureza

Segundo Callister e Rethwisch (2016), a dureza é uma propriedade mecânica que mede a resistência de um material a uma deformação plástica localizada. Essa propriedade pode ser obtida de forma simples e barata, sem a destruição total do corpo de prova, e é uma forma muito interessante de estimar o limite de resistência à tração sem precisar realizar um ensaio de tração.

A medida da dureza pode ser realizada em várias escalas: escala Rockwell B e C, Brinell, Knoop e Vickers, e Mohs. Cada tipo de ensaio tem suas próprias particularidades, como carga e tipo de indentador.

A dureza é calculada com base na profundidade ou no tamanho da indentação resultante. Quanto mais profunda é a indentação, menor é a sua dureza.

Além disso, tem-se que a dureza, da mesma forma que o limite de resistência à tração, são indicadores de resistência de um metal quanto à deformação plástica. Desse modo, é possível observar uma relação proporcional entre o valor da dureza e o limite de resistência à tração para alguns metais. Essa relação é dada pela equação (4), onde HB é o valor da dureza na escala Brinell (Callister; Rethwisch, 2016).

$$\sigma_{LR} [MPa] = 3,45 \cdot HB \quad (4)$$

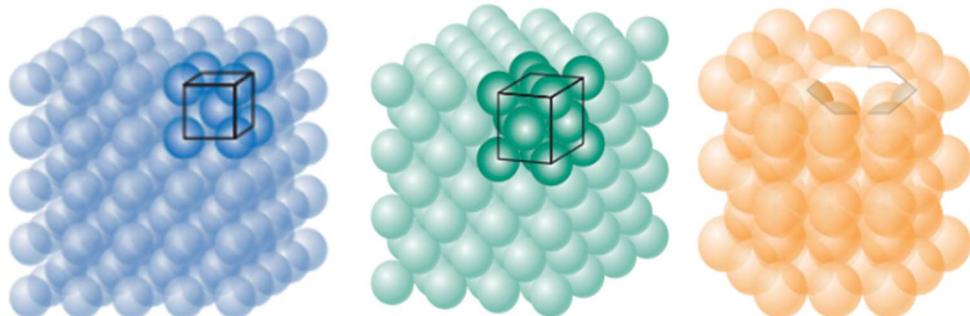
onde: σ_{LR} = Limite de resistência à tração;
 HB = dureza na escala Brinell;

2.3 DIAGRAMAS DE FASE

A microestrutura de uma liga de aço depende de diversos fatores como: concentração dos elementos, métodos de fabricação e tratamentos térmicos. Em aços, diferentes microestruturas com variados arranjos atômicos podem ser formadas, alguns exemplos são ilustrados na Figura 6.

Segundo Callister e Rethwisch (2016), o conceito de fase pode ser definido como uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes. Cada fase também existe sob determinadas condições. O diagrama de fases de um material analisa o comportamento dos sistemas cristalinos quando variam a temperatura, pressão e composição.

Figura 6: Exemplos de diferentes estruturas cristalinas, da esquerda para direita: cúbica de corpo centrado, cúbica de face centrada, hexagonal simples.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

Na engenharia, é uma prática comum realizar tratamentos térmicos para transitar entre diferentes fases e obter diferentes propriedades mecânicas. Para a realização de tratamentos térmicos, o fator tempo é considerado essencial para a obtenção das transformações entre fases, sendo muito utilizado o diagrama TTT (tempo-temperatura-transformação). Quando as temperaturas não são mantidas constantes, o diagrama TTT apresenta curvas de resfriamento contínuo, conhecidas como curvas RC.

2.3.1 Microestruturas do Aço

As diferentes condições de processamento e tratamento térmico dos aços resultam na formação de diversas microestruturas, cada uma com características e propriedades mecânicas distintas. A seguir são apresentadas as principais microestruturas encontradas em aços carbono e aços ligados.

2.3.1.1 Ferrita

A ferrita, também conhecida como ferro-alfa (α), é uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Segundo Callister e Rethwisch (2016), a ferrita se forma durante o resfriamento lento de aços hipoeutetóides, geralmente nos contornos de grão da austenita.

2.3.1.2 Austenita

A austenita, ou ferro-gama (γ), é uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). A austenita não é estável à temperatura ambiente, transformando-se em outras microestruturas durante o resfriamento. No entanto, a adição de elementos de liga estabilizadores, como níquel e manganês, pode manter a austenita estável mesmo em temperaturas mais baixas (Callister e Rethwisch, 2016).

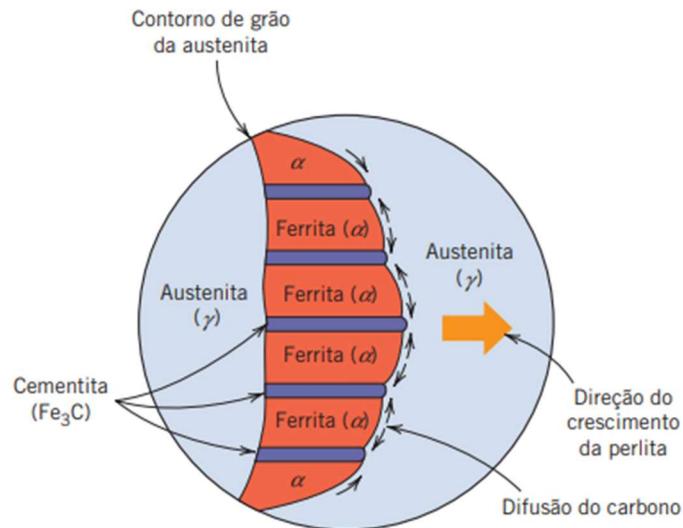
2.3.1.3 Cementita

A cementita (Fe_3C) é um composto intermetálico duro e frágil que aumenta significativamente a dureza e a resistência mecânica do aço, porém reduz a ductilidade e a tenacidade. A cementita pode aparecer de diferentes formas na microestrutura, seja como partículas isoladas, em lamelas na perlita, na bainita ou em redes contínuas nos contornos de grão em aços hipereutetóides (Callister e Rethwisch, 2016).

2.3.1.4 Perlita

A perlita é uma microestrutura lamelar composta por camadas alternadas de ferrita e cementita, formada pela decomposição austenita, como é possível visualizar na Figura 7. De acordo com Colpaert (2008), o espaçamento entre as lamelas de cementita determina as propriedades mecânicas da perlita: quanto menor o espaçamento interlamelar, maior a dureza e a resistência mecânica. A perlita grossa é obtida através de resfriamento lento, enquanto a perlita fina resulta de taxas de resfriamento moderadas. As propriedades da perlita são intermediárias entre a ferrita macia e a cementita dura.

Figura 7: Formação da perlita a partir da austenita.

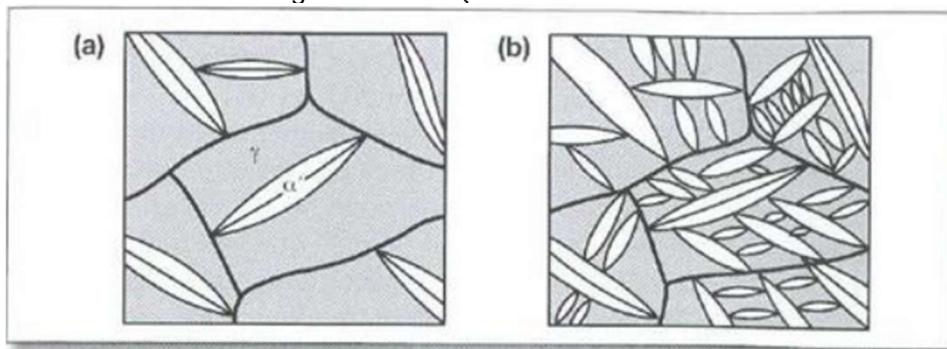


Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

2.3.1.5 Martensita

A martensita é uma fase metaestável formada pela transformação não-difusional da austenita durante resfriamento rápido (têmpera). Segundo Colpaert (2008), a martensita possui estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), resultante da distorção da estrutura CCC devido aos átomos de carbono aprisionados em solução sólida supersaturada. Essa microestrutura é caracterizada por alta dureza e resistência mecânica, porém apresenta baixa ductilidade e alta fragilidade. A formação da martensita ocorre quando a taxa de resfriamento é suficientemente rápida para suprimir a difusão de carbono, impedindo a formação de ferrita e cementita, e sua formação se dá de forma alongada em formato de “ripas”, como mostrado na Figura 8.

Figura 8: Formação da martensita.

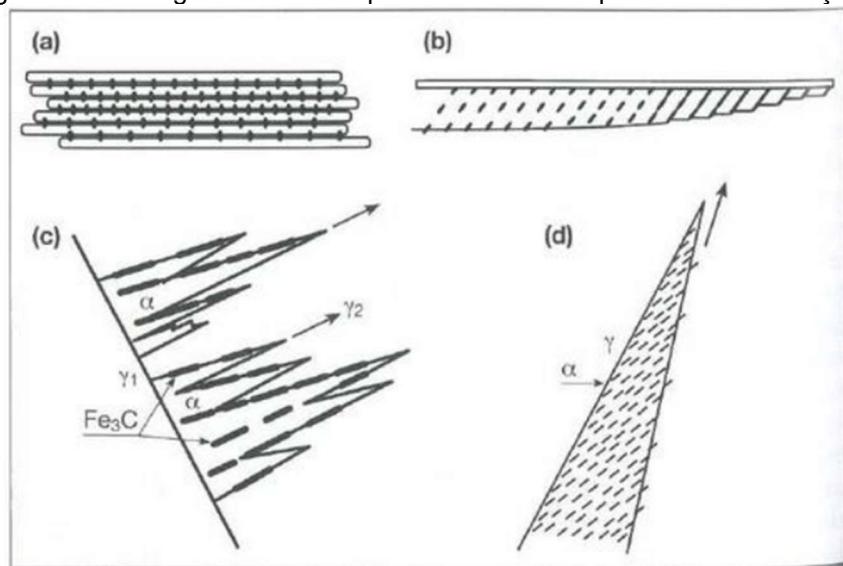


Fonte: Adaptado de Colpaert (2008).

2.3.1.6 Bainita

A bainita é uma microestrutura formada pela transformação da austenita em temperaturas intermediárias, entre aquelas nas quais se formam a perlita e a martensita. De acordo com Colpaert (2008), existem dois tipos principais: a bainita superior, formada em temperaturas mais altas (entre 400°C e 550°C), que possui morfologia semelhante à perlita com partículas de cementita mais finas (Figura 9 (a) e (c)); e a bainita inferior, formada em temperaturas mais baixas (entre 250°C e 400°C), que apresenta estrutura acicular semelhante à martensita revenida (Figura 9 (b) e (d)). A bainita oferece uma combinação favorável de propriedades, apresentando maior tenacidade que a martensita e maior resistência que a perlita.

Figura 9: Morfologia da bainita superior e inferior e o processo de formação.

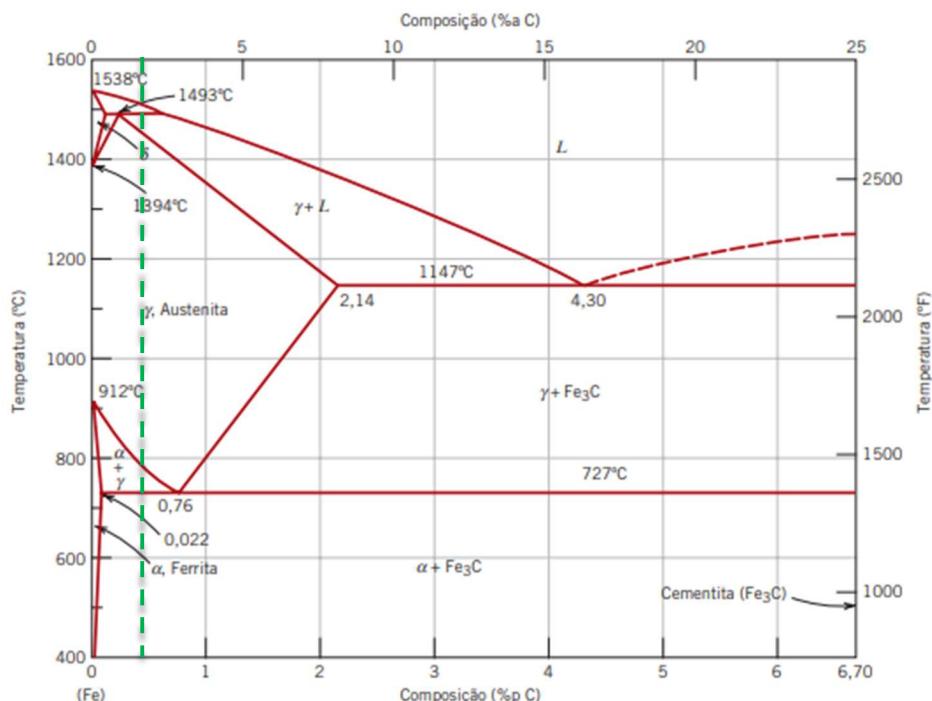


Fonte: Adaptado de Colpaert (2008).

2.3.2 Diagrama Ferro-Carbono

O diagrama Ferro-Carbono mostra as diferentes fases para diferentes temperaturas, e tem como principal parâmetro a composição de carbono, como é possível observar na Figura 10.

Figura 10: Diagrama Ferro-Carbono.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

Aços com a composição entre 0,022 %C e 0,76 %C são chamados de hipoeutetóide devido a terem valores abaixo do ponto eutetóide (localizado em 0,76% C). Ao aquecer aços com essa composição é observado a fase austenítica (também chamada de ferro-gama (γ), com estrutura cúbica de face centrada). Durante o resfriamento dessa liga é possível observar duas fases simultaneamente: austenita (γ) + ferrita (α). A ferrita se forma ao longo dos contornos dos grãos de austenita (Callister; Rethwisch, 2016). Após resfriar abaixo de 720 °C a austenita restante se transforma em perlita, mantendo duas fases simultâneas: perlita + ferrita (α).

Materiais com adição de elementos de liga apresentam alterações em suas propriedades, isso significa que sua microestrutura pode ser alterada, e bem como o diagrama de fases. A adição de Cromo, Níquel e Molibdênio interfere diretamente na posição das linhas de transformação, em suas zonas críticas e na zona austenítica (Chiaverini, 1986).

Para o aço SAE 4130, os elementos de liga predominantes são o Cr, Mn, Si e Mo. Segundo Chiaverini (1986), o Mn, alarga a faixa de temperaturas para a austenita estável. Além disso, Mo, Si, Ni, Mn, Cr tendem a deslocar o ponto eutetóide para a esquerda, diminuindo o teor de carbono. A temperatura do ponto eutetóide também é modificada: Mn e Ni tendem a diminuir a temperatura, enquanto Cr, Si e Mo tendem a aumentá-la. O Manganês é um grande responsável pela estabilização da cementita, dificultando a sua decomposição.

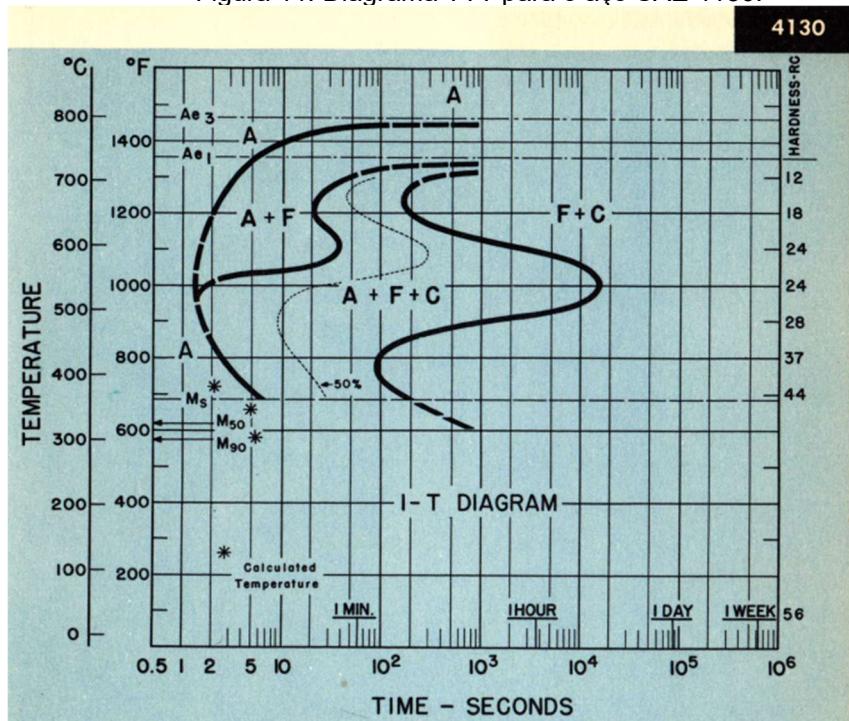
Diagramas de fase são também conhecidos como diagramas de equilíbrio, e apresentam as transformações que ocorrem a velocidades muito baixas. Quando o resfriamento ocorre em velocidades mais elevadas há a formação de microestruturas diferentes daquelas que o diagrama de fases prevê, e então são utilizadas as curvas TTT, que leva o tempo como variável.

2.3.3 Diagrama TTT/ TRC

As curvas TTT (Tempo, Temperatura, Transformação) estabelecem a temperatura e o tempo em que ocorre uma determinada transformação. As transformações de fases ocorrem em duas etapas: nucleação, que é a formação de núcleos da nova fase nos contornos de grão, e o crescimento de grão, onde os núcleos aumentam de tamanho, e o volume da fase original diminui.

Segundo Colpaert (2008), a combinação entre a taxa de nucleação e a velocidade de crescimento determina a velocidade da transformação isotérmica. As curvas TTT avaliam se para cada temperatura a transformação ocorrerá de forma lenta ou rápida. A curva TTT do aço SAE 4130 está presente na Figura 11.

Figura 11: Diagrama TTT para o aço SAE 4130.



Fonte: Adaptado de Research Laboratory (1951).

A curva TRC trata de transformação sob resfriamento contínuo, e segundo Colpaert (2008), essa curva tem importância para conhecer os efeitos de diferentes taxas de resfriamento sobre a austenita. Inicialmente ao aquecer o material, é estabelecida a fase austenítica, no entanto a velocidade em que se dá o resfriamento vai determinar quais fases serão obtidas. Resfriamentos mais lentos, realizados no forno, no ar, ou ar soprado, tem como microestrutura obtida a perlita grossa, ou perlita fina. Resfriamentos realizados em óleo, têm como resultado perlita e martensita. E resfriamentos mais rápidos, como quando é realizado em água obtém-se a martensita.

3 METODOLOGIA

A realização deste trabalho foi conduzida conforme o fluxograma presente na Figura 12. O fluxograma envolve etapas como preparação dos corpos de prova, realização dos tratamentos térmicos, análises quanto às propriedades mecânicas e sua microestrutura.

Figura 12: Fluxograma dos procedimentos realizados neste trabalho.



Fonte: Autoria própria.

3.1 MATERIAL

O aço SAE 4130 empregado neste estudo foi adquirido diretamente pela graduanda junto à empresa Aerotubos, na forma de barras cilíndricas com 450 mm de comprimento e 12,7 mm de diâmetro. A composição química do material, conforme especificada no certificado fornecido pelo fabricante presente no Anexo A, está apresentada na Tabela 2 e foi comparada aos limites estabelecidos pela norma SAE J404.

Tabela 2: Composição aço SAE 4130 utilizado, valores em porcentagem %.

	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Mo	% P	% S	% Cu	% Ni	% Al
Norma SAE J404	0,28 - 0,33	0,40 - 0,60	0,15 - 0,35	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	Máx. 0,035	Máx. 0,040	-	-	-
Material utilizado	0,31	0,53	0,24	0,98	0,22	0,011	0,008	0,04	0,06	0,035

Fonte: Adaptado de SAE J404 (2009); adaptado de Vallourec et al. (2022).

3.2 SELEÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para melhorar as propriedades mecânicas do aço SAE 4130, foram analisados tratamentos térmicos com influência nas propriedades mecânicas de resistência ao escoamento e tenacidade.

A escolha foi orientada pela identificação da zona estriada do semieixo como região crítica, onde há maior acúmulo de tensões, conforme observado em testes de campo realizados pela Equipe Mangue Baja. Para o controle desse acúmulo de tensões na zona crítica foi estabelecido um limite máximo de dureza de 300 HB, ou 32 HRC. Esse valor foi estabelecido com base na dureza do semieixo atual, fabricado em aço SAE 4340, e corresponde a uma resistência à tração de aproximadamente 1.035 MPa. Essa restrição tem como objetivo preservar a capacidade do componente de absorver impactos e deformações, evitando o aumento da fragilidade na região crítica.

Segundo Colpaert (2008), a microestrutura mais eficaz para conciliar resistência e tenacidade dos aços é a martensita revenida. Por isso, adotou-se a têmpera como tratamento térmico principal, com o objetivo de aumentar a resistência ao escoamento, e para alcançar os níveis desejados de resistência à tração e dureza, foi aplicada a sequência de têmpera seguida de revenimento, assegurando um bom equilíbrio entre propriedades mecânicas e tenacidade.

A primeira etapa da têmpera consiste no aquecimento da peça até a temperatura adequada para a decomposição da austenita. Para isso, foi necessário

definir a temperatura de austenitização, utilizando como referência o ASM Handbook Committee (1990), que recomenda para o aço SAE 4130 uma faixa entre 845 °C e 870 °C. Optou-se, então, pela temperatura de 870 °C.

O tempo de permanência no forno varia conforme o diâmetro da peça. Neste experimento, os corpos de prova, com 9 mm de diâmetro na região útil, foram mantidos no forno por 1 hora. Após esse período, metade das amostras foi resfriada em água e a outra metade em óleo.

Para o revenimento, as temperaturas de reaquecimento foram definidas com base nas tabelas técnicas do ASM Handbook Committee (1990), conforme apresentado no Anexo B. A partir dessas referências, foram estabelecidos quatro conjuntos de amostras com diferentes tratamentos térmicos, com as temperaturas de aquecimento e reaquecimento descritas na Tabela 3, além de um conjunto de amostras padrão, sem tratamento térmico, utilizado como referência. Foram definidos 5 conjuntos de procedimentos.

Tabela 3: Definição dos tratamentos térmicos a serem realizados.

Amostra	ID.	Tratamento térmico
Amostra 1	Padrão	Sem tratamentos térmicos (amostra de referência)
Amostra 2	TA	Têmpera em água 870°C + resfriamento ao ar
Amostra 3	TAR	Têmpera em água 870°C + revenimento 540 °C + resfriamento ao ar
Amostra 4	TO	Têmpera em óleo 870°C + resfriamento ao ar
Amostra 5	TOR	Têmpera em óleo 870°C + revenimento 425 °C + resfriamento ao ar

Fonte: Autoria própria.

3.3 CORPO DE PROVA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova foram usinados no Centro de Torneamento CNC 4 eixos Ecoturn 310 localizado na oficina do Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), Figura 13.

Figura 13: Usinagem dos corpos de prova no torno CNC.



Fonte: Autoria própria.

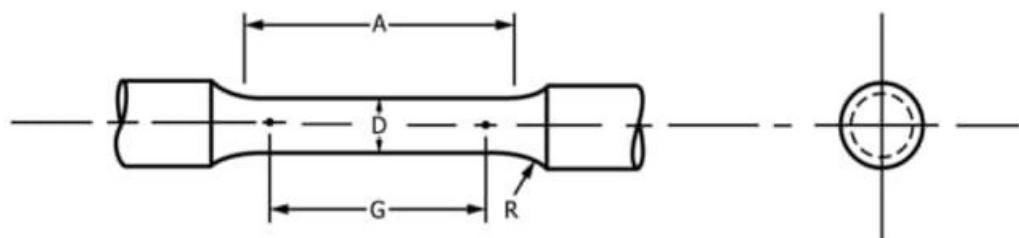
Foram usinados 15 corpos de prova de aço SAE 4130 com 150 mm de comprimento, mostrados na Figura 14. Devido às limitações geométricas da máquina de ensaio de tração, o diâmetro máximo do corpo de prova não pode ultrapassar 13 mm, desta forma foi utilizado como referência a Specimen 2, conforme a norma ASTM E8/E8M. As medidas presentes na Figura 15 são apresentadas na Tabela 4.

Figura 14: Conjunto de corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15: Esquemático do corpo de prova para o ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M.

Tabela 4: Dimensões dos corpos de prova segundo a ASTM E8/E8M, Specimen 2.

Variável	Descrição	Unidade em mm
D	Diâmetro	9
A	Comprimento inicial (base de medida)	45
G	Comprimento Gauge	36
L_t	Comprimento total do corpo de prova	150
R	Raio de adoçamento	8

Fonte: Autoria própria, baseada na norma ASTM E8/E8M.

3.4 TRATAMENTO TÉRMICO

Os tratamentos térmicos foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM). Visando garantir uniformidade nas condições de processamento, os tratamentos térmicos foram conduzidos simultaneamente, e para isso os corpos de prova foram amarrados conjuntamente utilizando arame de aço galvanizado, conforme ilustrado na Figura 16.

O forno mufla Jung LF4212 foi previamente aquecido a 870 °C, temperatura definida com base nas recomendações do ASM Handbook Committee (1990) para o aço SAE 4130. Os corpos de prova permaneceram no forno por 1 hora e, em seguida, foram submetidos à têmpera em dois meios diferentes: 6 corpos de prova foram resfriados em óleo até atingir 100°C e os outros 6 foram resfriados em água até 40 °C.

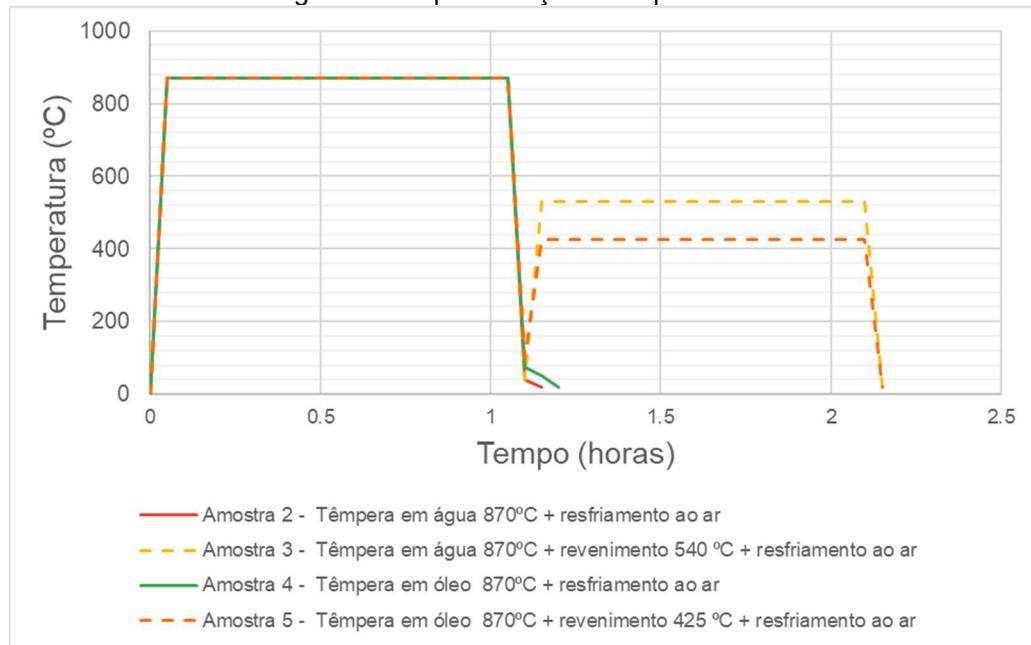
Figura 16: Preparação dos corpos de prova para a realização do tratamento térmico.



Fonte: Autoria própria.

A etapa de revenimento foi conduzida no forno mufla Jung LF6212. Após a têmpera em água, 3 corpos de prova foram submetidos ao revenimento a 540 °C, enquanto 3 corpos de prova temperados em óleo foram revenidos a 425 °C, ambos pelo período de 1 hora. As temperaturas foram monitoradas com auxílio de um pirômetro e o resfriamento após o revenimento foi realizado em ambiente climatizado a 20 °C. O procedimento completo seguiu o perfil térmico representado no gráfico da Figura 17.

Figura 17: Representação do experimento.



Fonte: Autoria própria.

3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Com o objetivo de caracterizar o material após os tratamentos térmicos, realizou-se inicialmente o ensaio de tração. Em seguida, após a preparação da superfície nas etapas de metalografia, foi executado o ensaio de dureza para a obtenção das principais propriedades mecânicas.

3.5.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração ocorreu no Laboratório de Ensaios Mecânicos no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) na máquina de ensaio de tração EMIC, modelo DL10000 com capacidade de 1 kN.

Para realização do ensaio de tração os corpos de prova foram fixados em suas extremidades e na região útil do corpo de prova foi acoplado um extensômetro para medição da deformação, conforme a Figura 18. Foi aplicada uma carga axial, até a ruptura do corpo de prova. Os dados obtidos foram armazenados com o auxílio de um sistema de aquisição de dados, onde foi possível analisar a curva tensão - deformação, e as propriedades mecânicas obtidas.

Figura 18: Fixação do corpo de prova com o extensômetro acoplado.



Fonte: Autoria própria.

3.5.2 Ensaio de dureza Rockwell

Antes da realização dos ensaios, as amostras foram submetidas a preparação de superfície, incluindo lixamento e polimento, a fim de garantir uma face plana e livre de irregularidades que pudessem interferir na leitura. O ensaio de dureza Rockwell foi

realizado com o objetivo de determinar a resistência do material à deformação após a realização dos tratamentos térmicos.

Os ensaios foram realizados em um durômetro Rockwell Mitutoyo HR-400 localizado no laboratório de Ensaios mecânicos, no INTM, presente na Figura 19.

Figura 19: Durômetro Rockwell Mitutoyo HR-400.



Fonte: Autoria própria.

Foram empregadas as escalas Rockwell B (HRB) e Rockwell C (HRC), selecionadas conforme o nível de dureza esperado em cada amostra. A escala C foi utilizada nas Amostras 2 e 4, em que foi realizada somente a etapa de têmpera, sem revestimento. Para essa escala foi utilizado um penetrador cônico de diamante e carga total de 150 kgf. A escala B foi aplicada nas Amostras 1, 3 e 5, e foi utilizado um penetrador esférico de aço com diâmetro de 1/16" e carga total de 100 kgf.

Em cada amostra foram efetuadas, 6 medições, sendo 5 medições ao longo do eixo radial e 1 medição na parte mais externa do corpo de prova, como mostrado na Figura 20.

Figura 20: Localização dos pontos de medição do ensaio de dureza no corpo de prova.



Fonte: Autoria própria.

3.6 METALOGRAFIA

A preparação metalográfica das amostras foi realizada com o objetivo de obter uma superfície adequada, removendo irregularidades e imperfeições, para a observação da microestrutura. O procedimento seguiu as etapas de corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico e a análise metalográfica.

Foi selecionado um corpo de prova de cada conjunto de amostras, e o critério de seleção foi o corpo de prova que apresentou melhor comportamento no quesito tensão e deformação após analisada a curva do ensaio de tração.

3.6.1 Corte

As 5 peças selecionadas foram serradas deixando uma pequena seção do corpo de prova de aproximadamente 15mm, e depois foi feito o faceamento e regularização da superfície no torno mecânico.

3.6.2 Embutimento

Após o corte, as amostras foram embutidas a quente com o objetivo de garantir uma maior firmeza e facilidade de manuseio para as próximas etapas. O embutimento foi realizado na prensa de embutimento automática Struers Citopress-30, mostrada na Figura 21, com Baquelite, à 250 bar e 180°C, no Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (LITPEG).



Fonte: Autoria própria.

3.6.3 Lixamento e polimento

O lixamento e o polimento foram ambos realizados no Laboratório de Caracterização de Revestimentos, que conta com uma Lixadeira Politriz Entex. Para o lixamento foram utilizadas as lixas d'água de numeração 220, 400, 600, 800, 1200 e 1500, sob fluxo contínuo de água para remoção de resíduos e redução do aquecimento superficial. Cada etapa de lixamento foi executada em sentido perpendicular à anterior, assegurando a eliminação completa dos riscos produzidos na etapa precedente. Após isso, sucedeu-se a etapa de polimento, que foi efetuada

em panos de feltro impregnados com pasta diamantada de 1 µm e lubrificante. O polimento foi realizado com movimentos em formato de “8” até a obtenção de uma superfície espelhada e livre de riscos visíveis.

3.6.4 Ataque químico

Após o polimento, as amostras foram submetidas ao ataque químico utilizando uma solução de Nital a 3%, preparada à base de álcool etílico. O reagente foi aplicado sobre a superfície polida por aproximadamente 10 segundos, seguido de lavagem imediata com álcool etílico e posterior secagem com ar quente. Esse procedimento teve como objetivo revelar os detalhes da microestrutura do material, como os contornos de grão e a presença de inclusões.

3.6.5 Análise metalográfica

As amostras foram analisadas em um microscópio óptico Zeiss Lab A1 AX10, presente na Figura 22, localizado no Laboratório de microscopia, no INTM. As observações foram realizadas sob ampliações variando de 100x a 1000x, e as imagens das microestruturas foram registradas por meio de uma câmera Axiocam 305 color acoplada ao microscópio.

A microestrutura observada foi comparada com as imagens de referência apresentadas por Colpaert (2008).

Figura 22: Microscópio óptico Zeiss Lab A1 AX10.



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir deste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após a realização dos procedimentos experimentais.

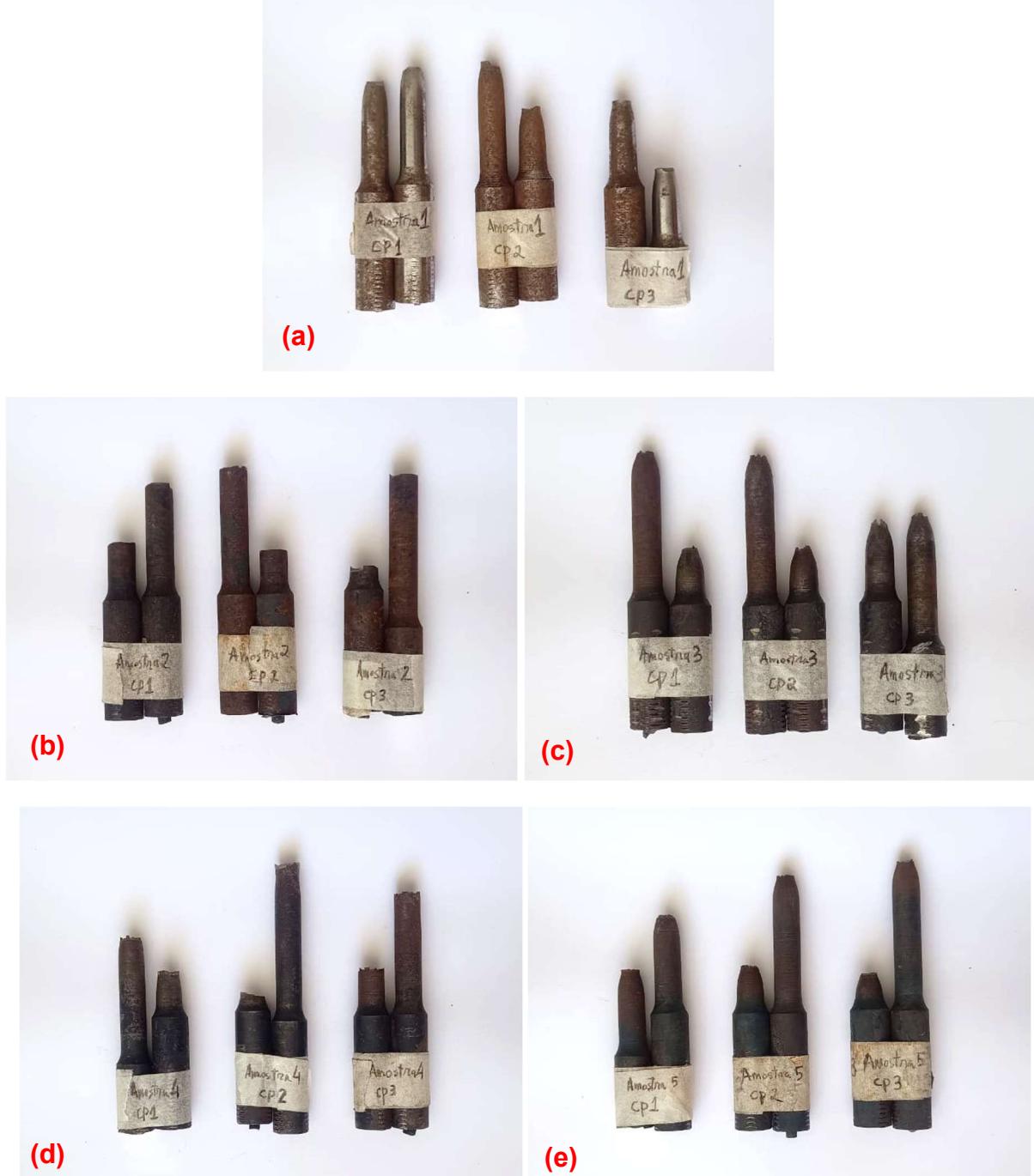
4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado em 15 corpos de prova, distribuídos em 5 grupos correspondentes aos diferentes tratamentos térmicos aplicados. A Amostra 1 (Padrão) representa o material no estado de fornecimento, sem tratamento térmico, e serve como referência para avaliação comparativa dos efeitos de cada tratamento nas propriedades mecânicas do aço SAE 4130.

A Figura 23 mostra os corpos de prova após os ensaios de tração. As Amostras 2 e 4 (temperadas em água e óleo, respectivamente) apresentaram fraturas características de comportamento frágil, evidenciadas pela ausência de estrição na região de ruptura. A superfície de fratura é aproximadamente perpendicular ao eixo de tração, com redução pouco significativa da área da seção transversal, indicando que o material sofreu fratura com baixa deformação plástica. Este comportamento é típico de estruturas martensíticas não revenidas, onde a alta dureza e resistência são acompanhadas de baixa capacidade de deformação. (Callister e Rethwisch, 2016).

Em contraste, as Amostras 3 e 5 (temperadas e revenidas) exibiram deformação plástica considerável antes da ruptura, com formação de estrição na região de fratura. A redução localizada da área da seção transversal e a geometria cônica característica da região de ruptura são indicativos de fratura dúctil, onde o material apresentou significativa capacidade de deformação antes da falha. Este comportamento demonstra que o processo de revenimento foi eficaz em restaurar a ductilidade do material, permitindo redistribuição de tensões e acomodação de deformações plásticas.

Figura 23: Corpos de prova fraturados após ensaio de tração.

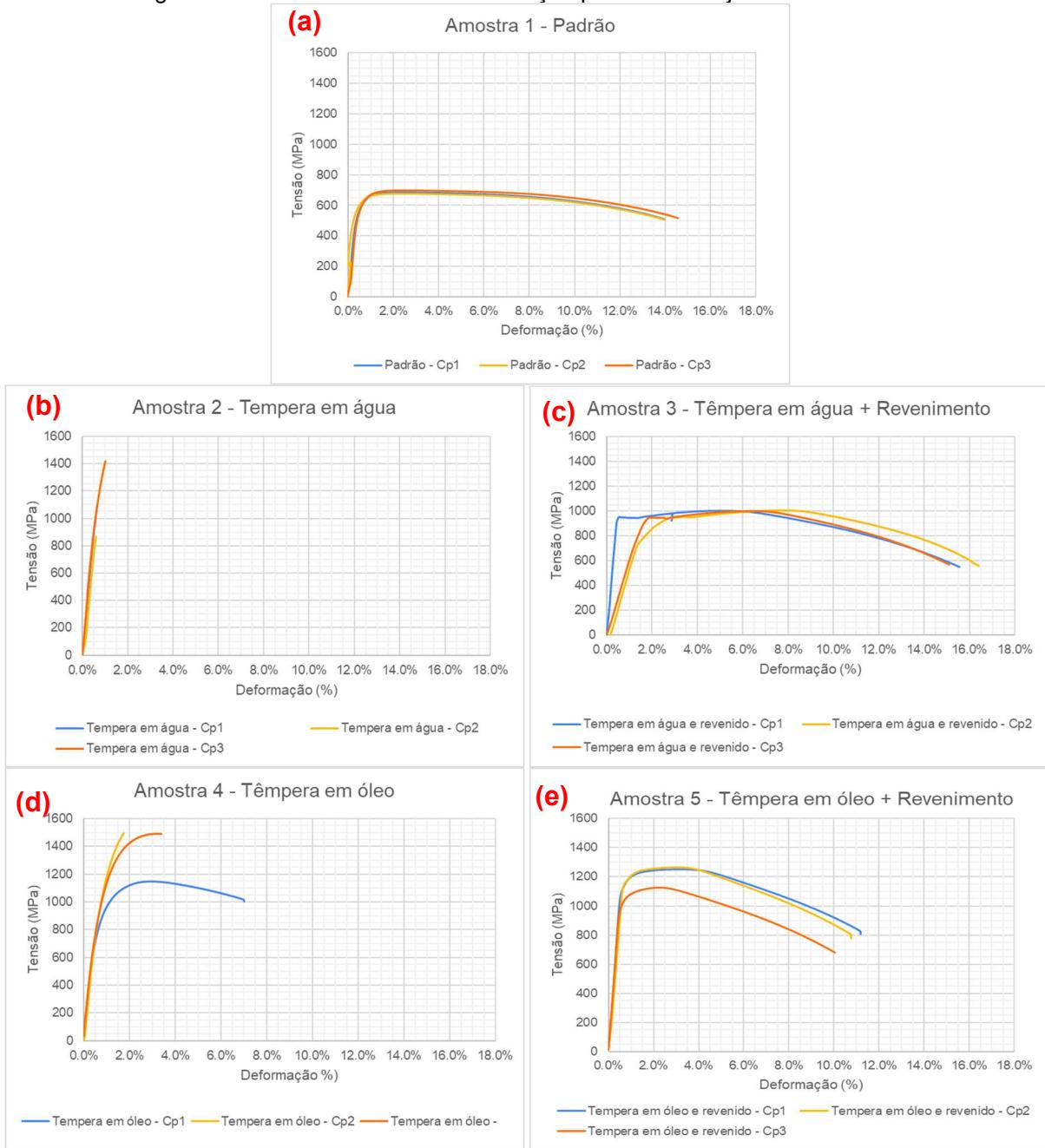


(a) Corpos de prova da Amostra 1; (b) Corpos de prova da Amostra 2; (c) Corpos de prova da Amostra 3; (d) Corpos de prova da Amostra 4; (e) Corpos de prova da Amostra 5;
Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 apresenta as curvas tensão-deformação de engenharia obtidas para cada condição de tratamento térmico. Nestas curvas, a tensão foi calculada

considerando a área da seção transversal inicial constante, sem considerar a estrição que ocorre durante a deformação plástica do material.

Figura 24: Curvas de tensão x deformação para cada conjunto de amostras.



- (a) Curva tensão-deformação da Amostra 1; (b) Curva tensão-deformação da Amostra 2;
 - (c) Curva tensão-deformação da Amostra 3; (d) Curva tensão-deformação da Amostra 4;
 - (e) Curva tensão-deformação da Amostra 5;
- Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova que apresentaram maior tensão, e maior deformação foram: Amostra 1 – Cp1, Amostra 2 – Cp3, Amostra 3 – Cp2, Amostra 4 – Cp1, Amostra 5 – Cp1. Estes corpos de prova foram selecionados para as etapas de ensaio de dureza e microscopia ótica.

Na Tabela 5 é possível encontrar as propriedades obtidas, como resultado do ensaio de tração, a partir das curvas de tensão-deformação.

Tabela 5: Resultados do ensaio de tração.

	Id.	Resistencia ao escoamento	Resistencia à tração	Deformação específica	Tensão de ruptura
		[Mpa]	[Mpa]	[%]	[Mpa]
Amostra 1 - Padrão	Cp1	577,88	687,00	13,9	510,00
	Cp2	606,25	678,00	13,9	506,00
	Cp3	593,97	700,00	14,5	517,43
Amostra 2 - Tempera em Água	Cp1	1101,00	1101,00	0,7	1101,06
	Cp2	866,00	866,00	0,5	863,47
	Cp3	1211,72	1416,00	1,0	1416,00
Amostra 3 - Tempera em Água e Revenimento	Cp1	948,52	1002,00	15,6	554,00
	Cp2	848,00	1004,70	16,4	556,00
	Cp3	946,00	999,00	15,1	567,00
Amostra 4 - Tempera em Óleo	Cp1	772,08	1149,00	7,0	1016,75
	Cp2	1135,48	1494,00	-	-
	Cp3	901,76	1494,00	3,4	1492,24
Amostra 5 - Tempera em Óleo e Revenimento	Cp1	1149,33	1252,00	11,1	825,27
	Cp2	1176,79	1267,00	10,7	805,93
	Cp3	1035,86	1126,00	10,0	683,85

Fonte: Autoria própria.

Durante os ensaios de tração, o corpo de prova 2 da Amostra 4 atingiu o limite superior da máquina após变形ar 1.74%, por esse motivo a deformação específica e a tensão de ruptura não foram computadas.

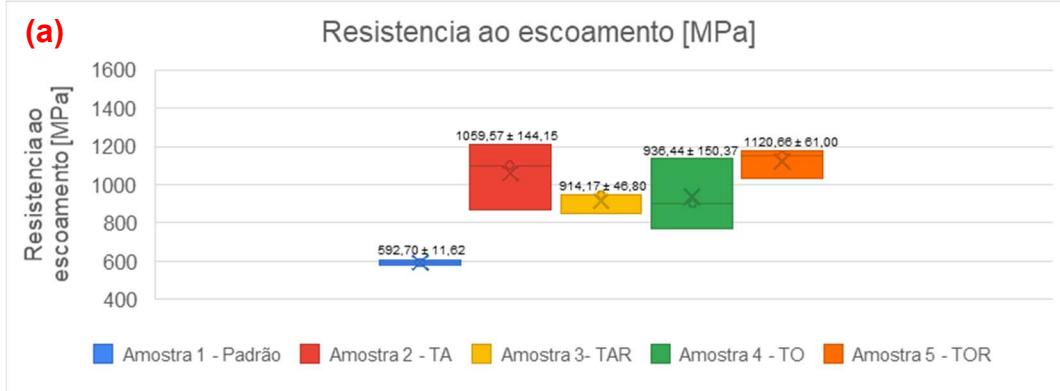
Para melhor compreensão e comparação entre os tratamentos térmicos aplicados, a Tabela 6 apresenta os valores médios e desvios padrão das principais propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração. Além disso também foi realizada a análise estatística, que permite avaliar a reprodutibilidade dos tratamentos e a dispersão dos resultados, representada pelos gráficos do tipo Boxplot mostrados na Figura 25.

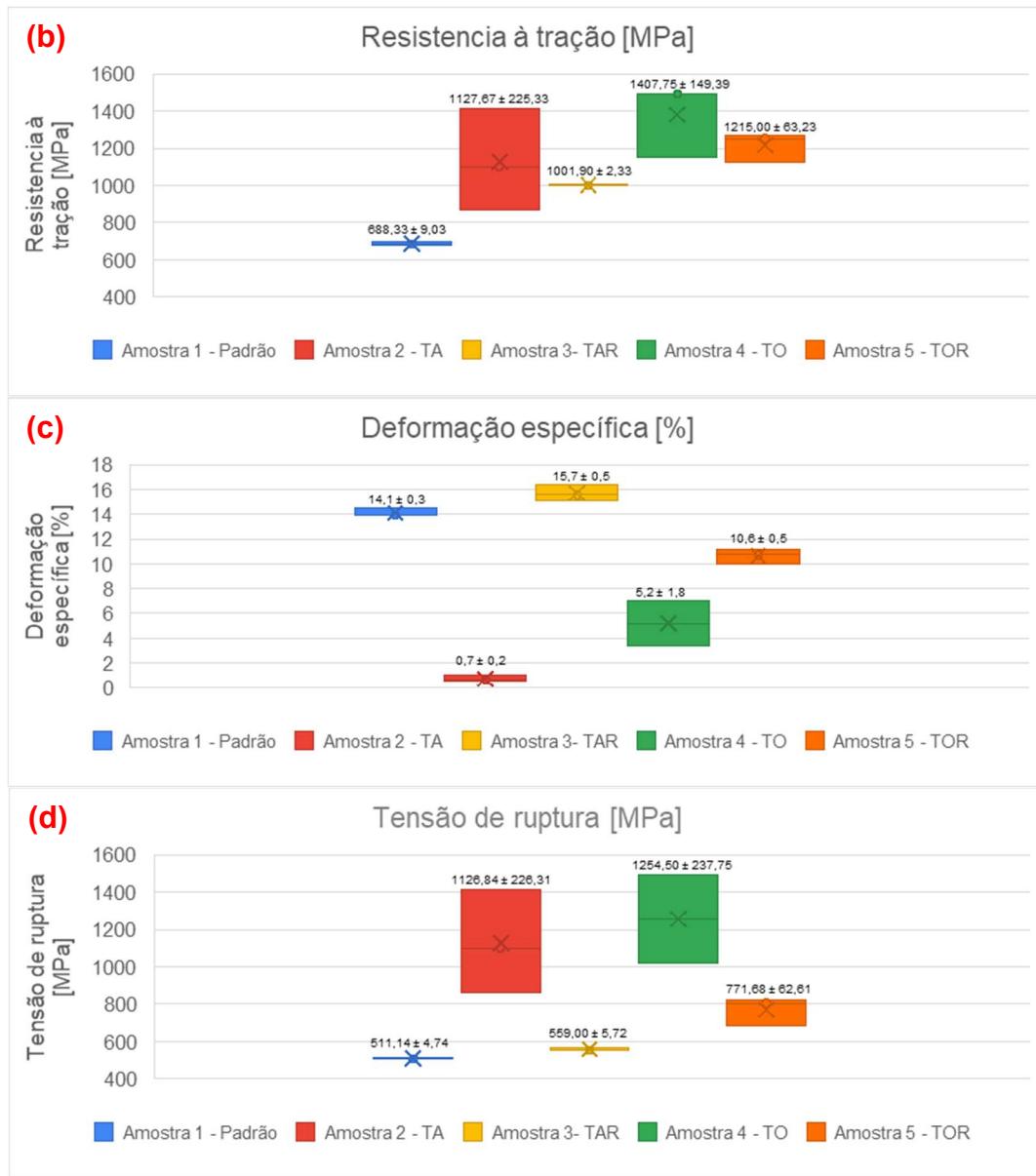
Tabela 6: Valores médios obtidos no ensaio de tração.

	Resistencia ao escoamento	Resistencia à tração	Deformação específica	Tensão de ruptura
	[Mpa]	[Mpa]	[%]	[Mpa]
Amostra 1 - Padrão	$592,70 \pm 11,62$	$688,33 \pm 9,03$	$14,1 \pm 0,3$	$511,14 \pm 4,74$
Amostra 2 - Tempera em Água	$1059,57 \pm 144,15$	$1127,67 \pm 225,33$	$0,7 \pm 0,2$	$1126,84 \pm 226,31$
Amostra 3- Tempera em Água e Revenimento	$914,17 \pm 46,80$	$1001,90 \pm 2,33$	$15,7 \pm 0,5$	$559,00 \pm 5,72$
Amostra 4 - Tempera em Óleo	$936,44 \pm 150,37$	$1407,75 \pm 149,39$	$5,2 \pm 1,8$	$1254,50 \pm 237,75$
Amostra 5 - Tempera em Óleo e Revenimento	$1120,66 \pm 61,00$	$1215,00 \pm 63,23$	$10,6 \pm 0,5$	$771,68 \pm 62,61$

Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Boxplot dos resultados do ensaio de tração para as principais propriedades mecânicas.





a) Resistência ao escoamento. (b) Resistência à tração. (c) Deformação específica.
 (d) Tensão de ruptura

Fonte: Autoria própria.

A análise da reprodutibilidade dos ensaios, evidenciada pela amplitude dos boxplots, revelou comportamentos distintos entre as condições de tratamento térmico. A Amostra 1 (padrão) apresentou excelente consistência nos resultados. As amostras 2 e 4, submetidas apenas à têmpera, demonstraram maior variabilidade nos valores obtidos. Por outro lado, as Amostras 3 e 5, que passaram pelo processo completo de

têmpera e revenimento, exibiram resultados mais consistentes, com destaque para a Amostra 3, que apresentou a menor dispersão nos valores de limite de resistência à tração e tensão de ruptura.

As amostras temperadas (2 e 4) apresentaram aumento significativo na resistência ao escoamento e à tração, porém com redução drástica na deformação total, caracterizando perda de ductilidade e fratura frágil. A Amostra 4, temperada em óleo, manteve níveis superiores de ductilidade quando comparada à Amostra 2 (temperada em água), devido à taxa de resfriamento mais moderada.

A Amostra 3, submetida à têmpera em água seguida de revenimento a 540°C, demonstrou notável restauração da ductilidade, com alongamento próximo ao do material padrão. Simultaneamente, a resistência à tração e ao escoamento aumentaram entre 45% e 54% em relação ao material não tratado, evidenciando um equilíbrio favorável entre resistência e tenacidade.

A Amostra 5, temperada em óleo e revenida a 425°C, alcançou os maiores incrementos de resistência: 76% na resistência à tração e 89% na resistência ao escoamento em relação ao corpo de prova padrão. Contudo, observou-se redução na deformação específica quando comparada ao material de referência.

De modo geral, o revenimento promoveu o alívio de tensões internas e a redução da fragilidade introduzida pela têmpera, restaurando parcialmente a ductilidade enquanto mantinha níveis elevados de resistência mecânica. Esta combinação resultou em um compromisso adequado entre resistência e tenacidade para aplicação no semieixo vazado do veículo Baja SAE.

4.2 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado em todas as amostras submetidas aos diferentes tratamentos térmicos. Devido às variações significativas nas propriedades mecânicas obtidas, foram empregadas as escalas Rockwell B (HRB) e Rockwell C (HRC), selecionadas conforme o nível de dureza esperado em cada amostra. A escala HRC foi utilizada nas Amostras 2 e 4, onde foi realizada somente a etapa de têmpera sem revenimento posterior, enquanto a escala HRB foi aplicada às demais amostras.

A Tabela 7 apresenta os valores de dureza obtidos para cada amostra nas respectivas escalas.

Tabela 7: Resultados obtidos através do ensaio de dureza.

	Escala	Valores					
Amostra 1	Rockwell B	90.2	94.7	94	94.7	93.8	93.8
Amostra 2	Rockwell C	47.3	52	52.9	53.1	53.2	50
Amostra 3	Rockwell B	106.9	107.4	107.2	106.7	105	107.4
Amostra 4	Rockwell C	18.8	42.6	37.4	40.3	44.6	40.5
Amostra 5	Rockwell B	109.7	112.3	112.4	112	112	112.2

Fonte: Autoria própria.

A dureza, segundo Callister e Rethwisch, 2016, não é uma propriedade bem definida dos materiais, e as diferenças experimentais entre as diversas técnicas de medição impediram o desenvolvimento de um sistema de conversão abrangente. As tabelas de conversão disponíveis foram determinadas experimentalmente e apresentam dependência do tipo e das características específicas de cada material.

Para possibilitar uma análise comparativa consistente entre todos os tratamentos térmicos, os valores de dureza foram convertidos para uma escala unificada utilizando as tabelas de conversão presentes no Anexo C, que utilizam como referência a norma ASTM E140.

A Tabela 8 apresenta os valores de dureza convertidos para a escala Rockwell C (HRC), permitindo comparação direta entre todos os tratamentos térmicos realizados.

Tabela 8: Durezas convertidas para a escala Rockwell C.

		HRC					
Amostra 1	Padrão	11	16	15	16	15	15
Amostra 2	TA	47.3	52	52.9	53.1	53.2	50
Amostra 3	TAR	32	32	32	32	29	32
Amostra 4	TO	18.8	42.6	37.4	40.3	44.6	40.5
Amostra 5	TOR	37	40	40	40	40	40

Fonte: Autoria própria.

Durante o ensaio de dureza da Amostra 4, uma das medições resultou em valor de 18,8 HRC, significativamente inferior aos demais (37,4 ~ 44,6 HRC). Este valor foi desconsiderado no cálculo da média por ser inconsistente com os demais

valores encontrados. As demais medições foram consideradas representativas do material.

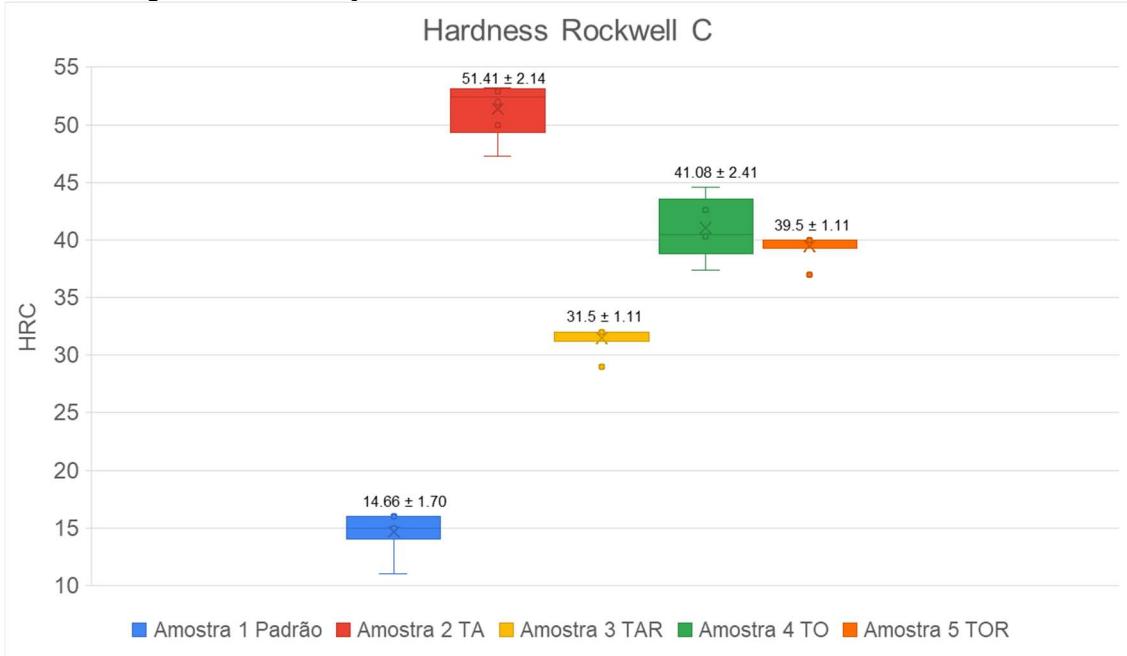
Desse modo, os valores médios e desvios padrão obtidos para cada amostra é apresentado na Tabela 9, e a análise estatística para o ensaio de dureza através do Boxplot segue na Figura 26.

Tabela 9: Média e desvio padrão para o resultado do ensaio de dureza.

		HRC
Amostra 1	Padrão	14.66 ± 1.70
Amostra 2	TA	51.41 ± 2.14
Amostra 3	TAR	31.5 ± 1.11
Amostra 4	TO	41.08 ± 2.41
Amostra 5	TOR	39.5 ± 1.11

Fonte: Autoria própria.

Figura 26: Distribuição dos resultados do ensaio de dureza na escala HRC.



Fonte: Autoria própria.

É possível observar que a Amostra 1 (padrão) apresenta a menor dureza, como esperado. As amostras submetidas apenas à têmpera (Amostras 2 e 4) apresentaram os maiores valores de dureza, enquanto as amostras temperadas e

revenidas (Amostras 3 e 5) apresentaram valores intermediários, evidenciando a eficácia do revenimento em reduzir a dureza da martensita.

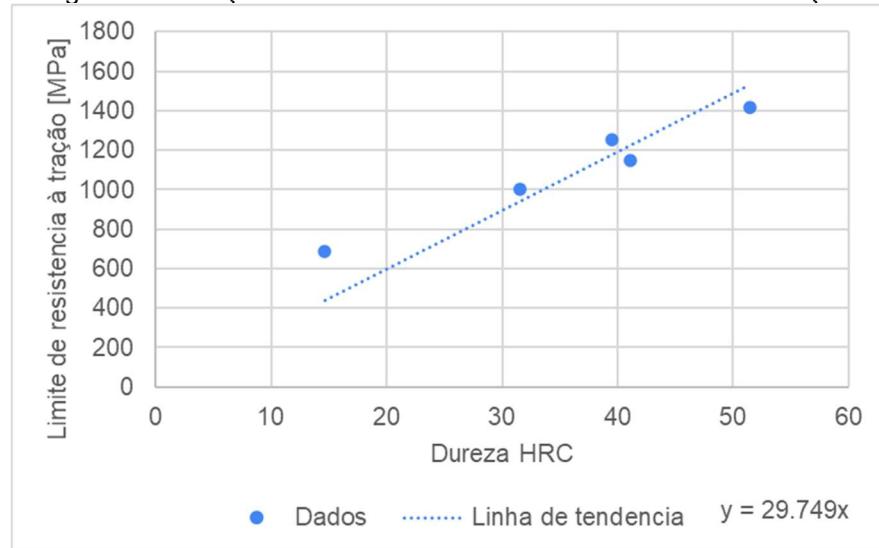
O efeito da temperatura de revenimento fica evidente ao comparar as Amostras 3 e 5: o revenimento a 540°C (Amostra 4) resultou em redução mais acentuada da dureza (31,5 HRC) em relação ao revenimento a 425°C (Amostra 5, com 39,5 HRC).

Segundo o Callister e Rethwisch (2016), o limite de resistência a tração e a dureza são propriedades indicadores de resistência de um material à deformação plástica, e consequentemente eles apresentam proporcionalidade. Na Figura 27 é possível visualizar esse comportamento, que pode ser descrito pela Equação (5), que representa apenas os dados desta pesquisa.

$$LRT [MPa] = 29.749 \cdot HRC \quad (5)$$

onde: LTR = Limite de resistência à tração, em MPa;
HRC = Dureza na escala Rockwell C;

Figura 27: Relações entre a dureza e o limite de resistência à tração.



Fonte: Autoria própria

É possível concluir que os dados obtidos experimentalmente possuem forte indicativo de que foram executados corretamente, e seguem a tendência geral esperada.

4.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

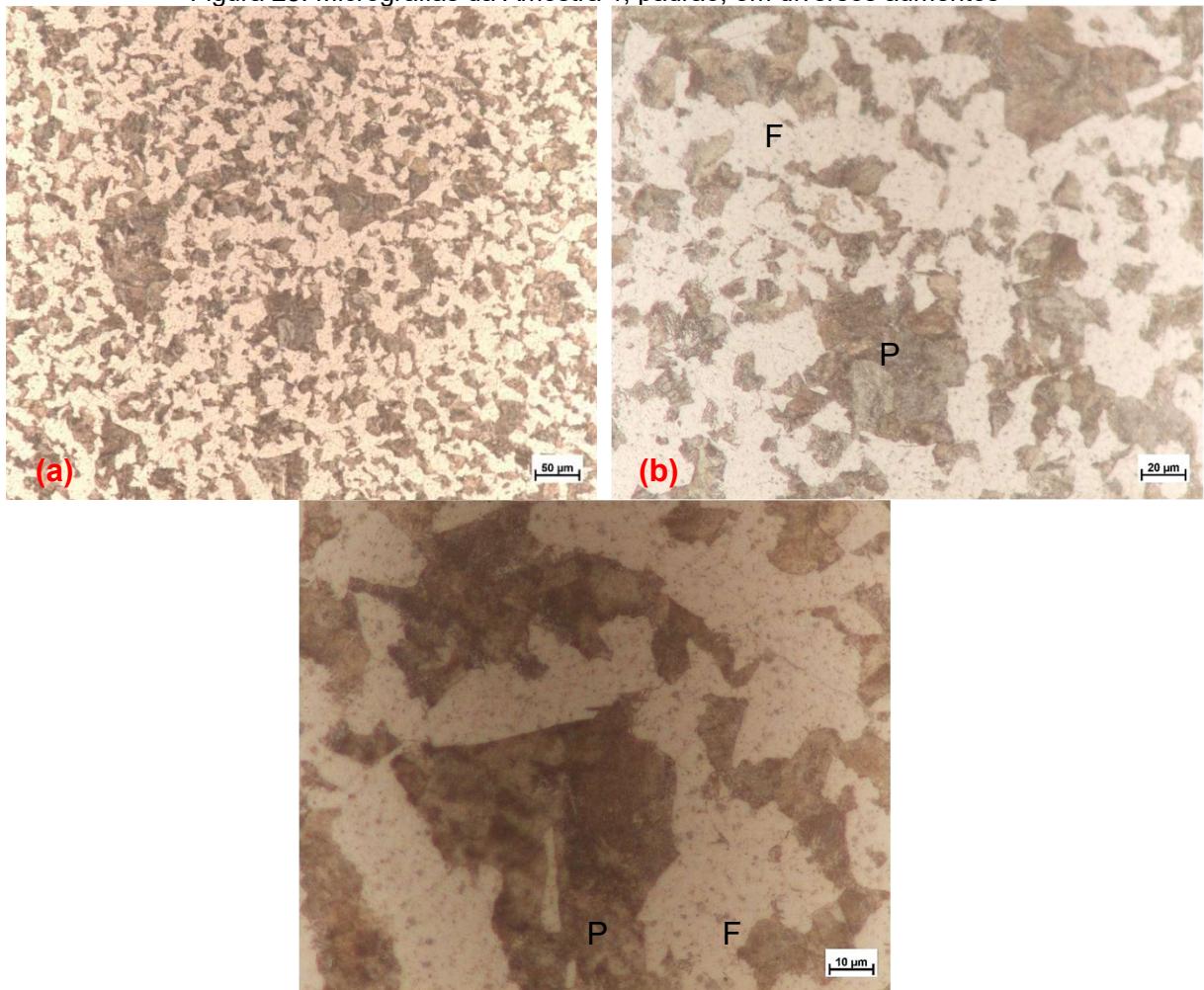
A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica em nas 5 amostras selecionadas. Após preparação metalográfica foram obtidas imagens em diferentes ampliações (200x, 400x, 1000x) para análise qualitativa e comparativa das microestruturas resultantes de cada tratamento.

4.3.1 Amostra 1 - Padrão

A Figura 28 apresenta a microestrutura da Amostra 1 no estado de fornecimento, sem realização de tratamento térmico adicional. Observa-se microestrutura bifásica composta por ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras), característica de aços hipoeutetóides como o SAE 4130 no estado normalizado.

Em maior ampliação observa-se que a ferrita proeutetóide, constituinte majoritário, apresenta-se na forma de grãos poligonais com contornos bem definidos, enquanto a perlita, produto da transformação eutetóide ($\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$) da austenita remanescente, distribui-se preferencialmente nos contornos de grão ferríticos e em regiões intergranulares (Callister; Rethwisch, 2016).

Figura 28: Micrografias da Amostra 1, padrão, em diversos aumentos



(a) Micrografia da Amostra 1 ampliada 200x; (b) Micrografia da Amostra 1 ampliada 400x; (c) Micrografia da Amostra 1 ampliada 1000x;
(c) Fonte: Autoria própria.

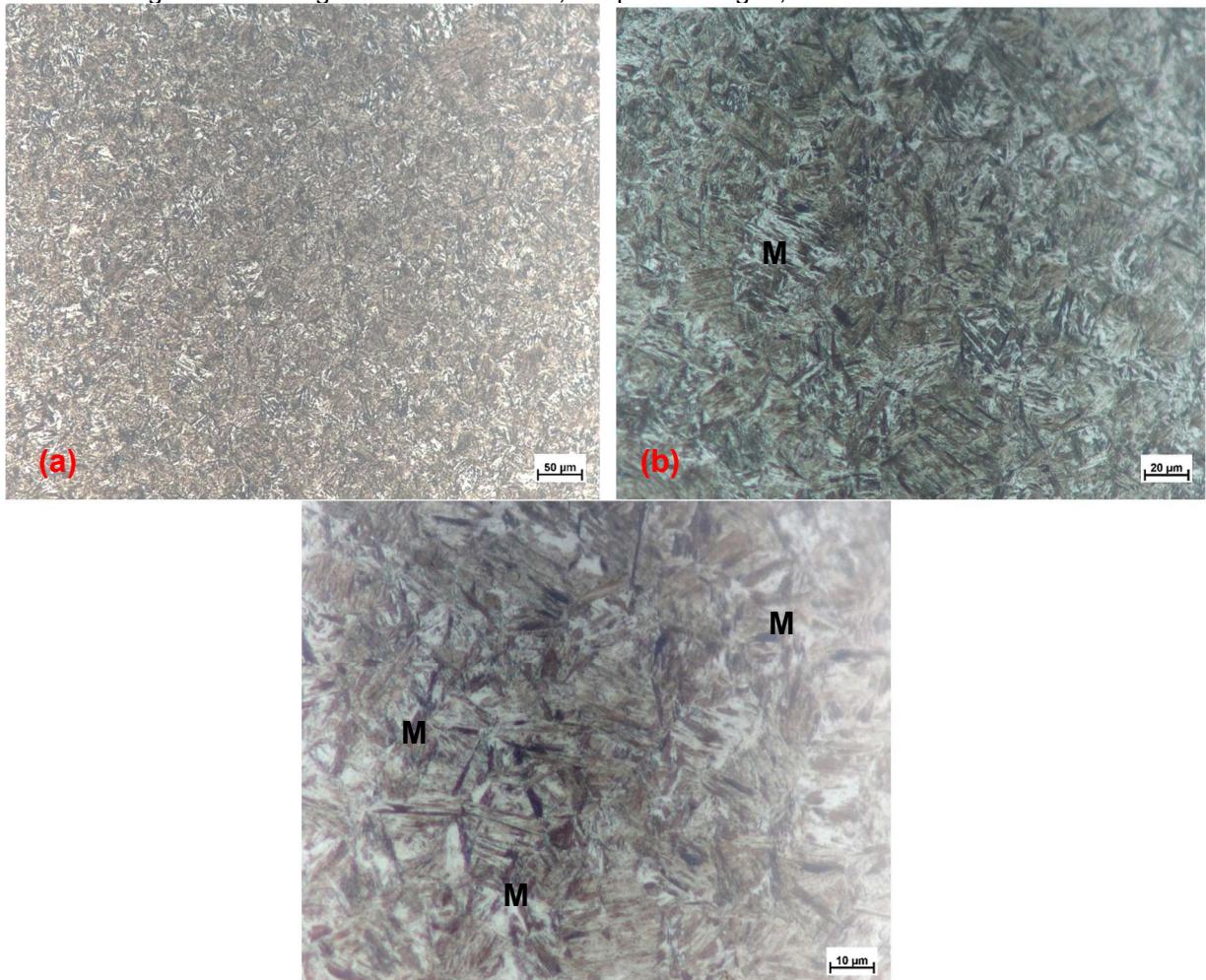
4.3.2 Amostra 2 - Têmpera em Água (TA)

Após têmpera em água a 870°C, a Amostra 2 (Figura 29) sofreu transformação quase completa em martensita, evidenciada pela morfologia acicular característica de ripas entrelaçadas. O resfriamento rápido proporcionado pela têmpera em água suprimiu as transformações difusivas que normalmente formariam ferrita e perlita, resultando na transformação não-difusional da austenita em martensita.

As propriedades mecânicas observadas nesta condição, elevada dureza e reduzida ductilidade, são consequências diretas desta microestrutura. A estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado, supersaturada em carbono, restringe

severamente a mobilidade de discordâncias, conferindo alta resistência à deformação plástica. Esta característica explica a fragilidade pronunciada do material, confirmada pela ausência de estrição nos corpos de prova fraturados durante o ensaio de tração. (Callister; Rethwisch, 2016).

Figura 29: Micrografias da Amostra 2, têmpera em água, em diversos aumentos.



(a) Micrografia da Amostra 2 ampliada 200x; (b) Micrografia da Amostra 2 ampliada 400x; (c) Micrografia da Amostra 2 ampliada 1000x;
Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Amostra 3 - Têmpera em Água + Revenimento 540°C (TAR)

O tratamento de revenimento a 540°C aplicado à Amostra 3, após têmpera em água, promoveu alterações microestruturais significativas quando comparada à Amostra 2 (Figura 30). A morfologia acicular da martensita foi completamente

substituída por uma estrutura mais homogênea, evidenciando a transformação ocorrida durante o processo de revenimento.

Figura 30: Micrografias da Amostra 3, têmpera em água e revenimento, em diversos aumentos.



(a) Micrografia da Amostra 3 ampliada 200x; (b) Micrografia da Amostra 3 ampliada 400x; (c)
(c) Micrografia da Amostra 3 ampliada 1000x;
 Fonte: Autoria própria.

A nova microestrutura consiste em uma matriz ferrítica clara, na qual se observam carbonetos precipitados finamente dispersos. Esses carbonetos, identificados como cementita (Fe_3C), são produto da decomposição da martensita supersaturada que ocorre durante o revenimento em temperaturas elevadas. O processo de difusão permitiu que os átomos de carbono aprisionados na estrutura tetragonal migrassem e formassem precipitados estáveis, transformando a martensita

metaestável em uma estrutura termodinamicamente mais estável. (Callister; Rethwisch, 2016).

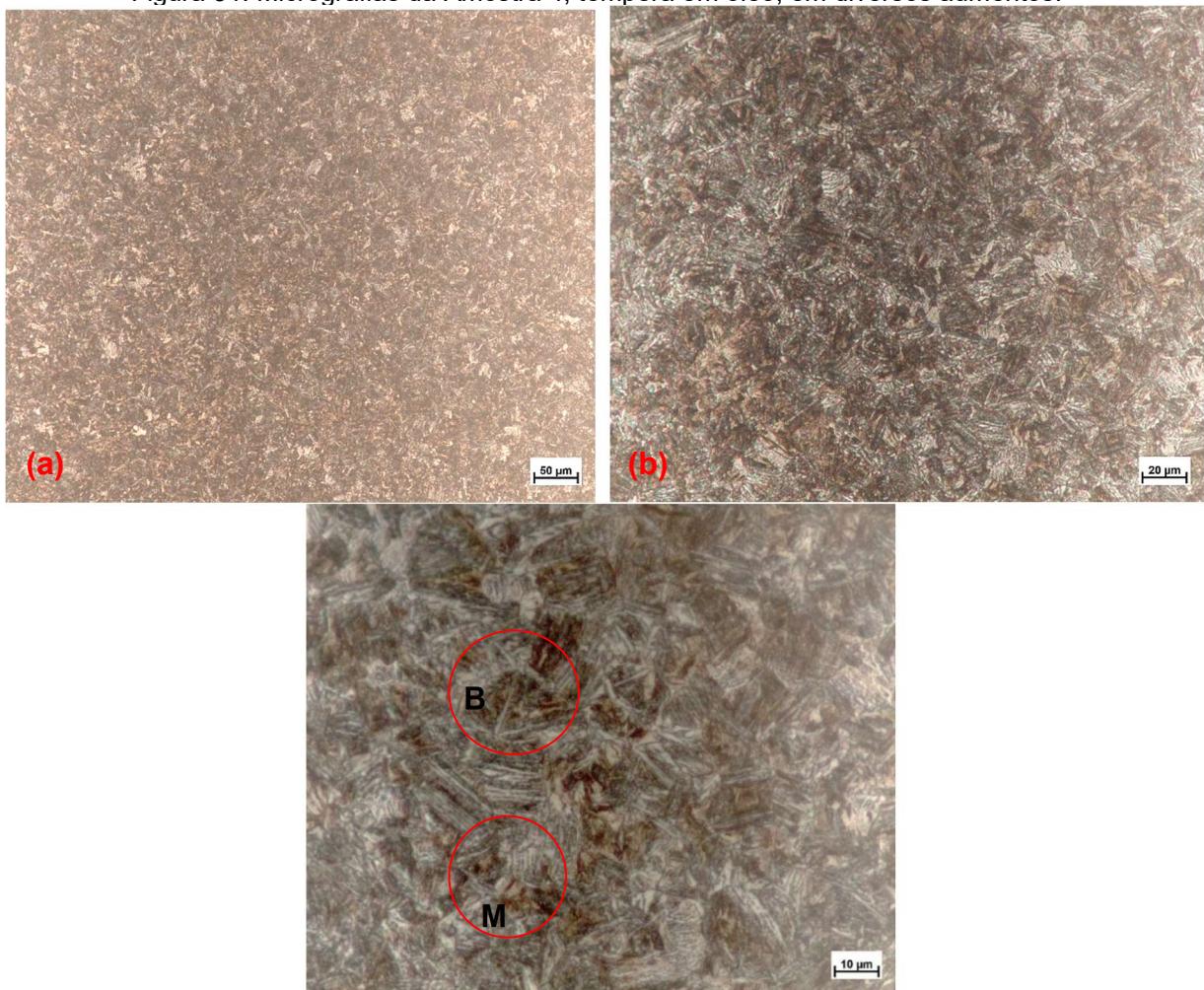
Como resultado, observou-se o alívio completo das tensões residuais características da têmpera, justificando a recuperação da ductilidade e a redução da fragilidade observadas nos ensaios mecânicos.

4.3.4 Amostra 4 - Têmpera em Óleo (TO)

A têmpera em óleo a 870°C produziu na Amostra 4 uma microestrutura marcadamente diferente daquela observada na têmpera em água, como é possível observar na Figura 31. A taxa de resfriamento intermediária proporcionada pelo óleo resultou em uma estrutura heterogênea, caracterizada pela coexistência de múltiplos constituintes de transformação com morfologias e tonalidades distintas. A estrutura acicular predominante apresenta ripas consideravelmente mais grosseiras que a martensita fina da Amostra 2, enquanto o contraste variável entre diferentes regiões evidencia a formação de constituintes em distintas faixas de temperatura durante o resfriamento contínuo.

Esta condição de resfriamento posicionou a transformação microestrutural na região crítica entre os regimes martensítico e bainítico do diagrama TTT. Como consequência, regiões predominantemente martensíticas alternam-se com regiões de possível formação bainítica, gerando gradientes locais de dureza: zonas martensíticas exibem maior dureza, enquanto regiões com características bainíticas apresentam valores inferiores.

Figura 31: Micrografias da Amostra 4, têmpera em óleo, em diversos aumentos.



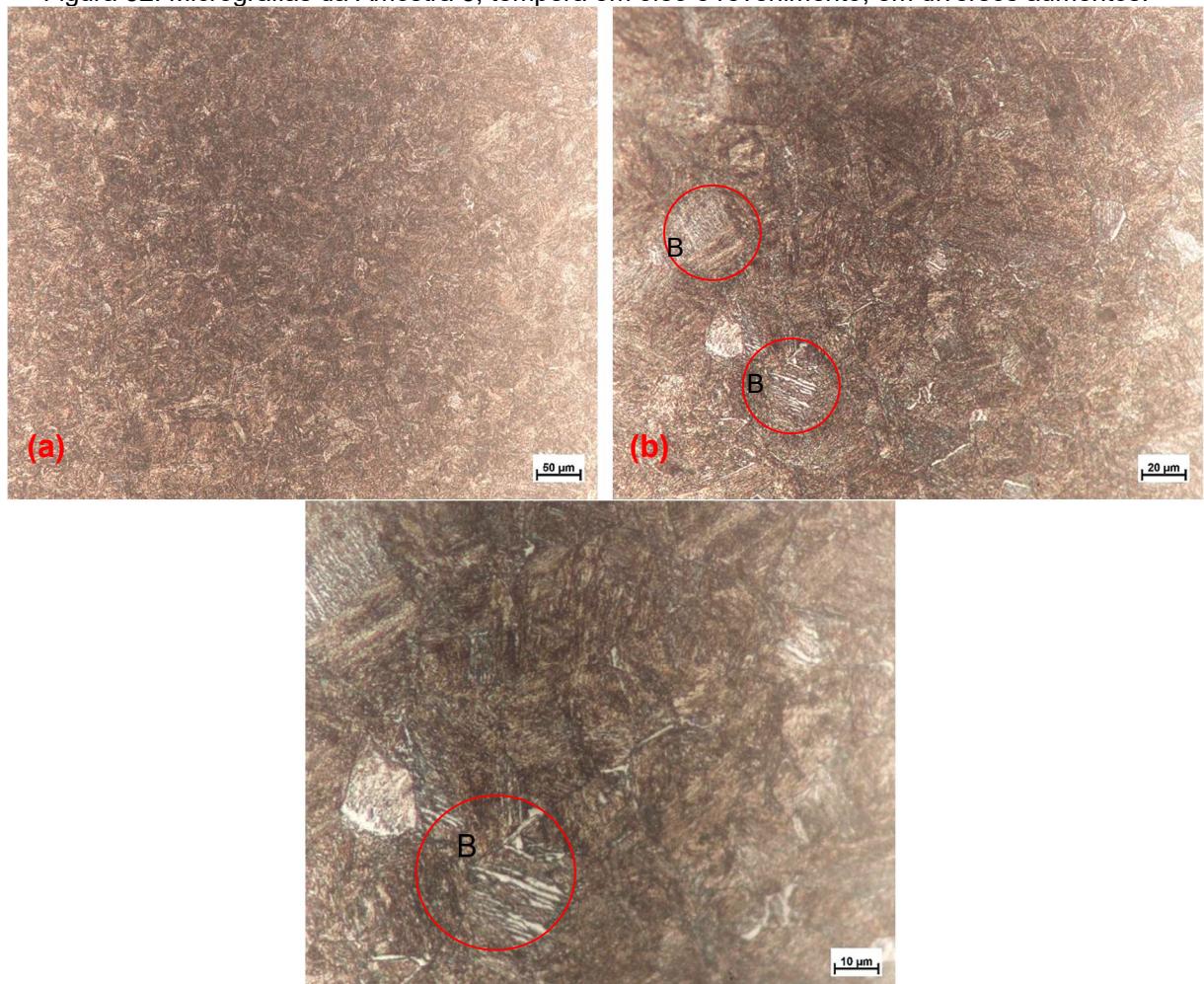
(b) Micrografia da Amostra 4 ampliada 200x; (b) Micrografia da Amostra 4 ampliada 400x; (c) Micrografia da Amostra 4 ampliada 1000x;
Fonte: Autoria própria.

4.3.5 Amostra 5 - Têmpera em Óleo + Revenimento 425°C (TOR)

O revenimento a 425°C aplicado à Amostra 5, embora tenha promovido transformações microestruturais, não foi completamente eficaz em homogeneizar a estrutura heterogênea herdada da têmpera em óleo (Figura 32). A microestrutura resultante consiste predominantemente em martensita revenida e bainita, com regiões localizadas onde a morfologia acicular original permanece claramente distinguível, comportamento contrastante com a Amostra 3, onde o revenimento a 540°C praticamente eliminou as características aciculares.

As ripas de martensita permanecem distinguíveis, indicando que o revenimento a 425°C promoveu a precipitação de carbonetos sem destruir a morfologia original. Os carbonetos se distribuem principalmente dentro das ripas e ao longo de seus contornos. A temperatura mais baixa de revenimento limitou a mobilidade dos átomos durante o tratamento, resultando em menor precipitação de carbonetos quando comparada à Amostra 3.

Figura 32: Micrografias da Amostra 5, têmpera em óleo e revenimento, em diversos aumentos.



(c) Micrografia da Amostra 5 ampliada 200x; (b) Micrografia da Amostra 5 ampliada

(c) 400x; (c) Micrografia da Amostra 5 ampliada 1000x;

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas do aço SAE 4130 por meio de tratamentos térmicos, visando aumentar o desempenho e a vida útil de um semieixo vazado aplicado em veículos Baja SAE. Os resultados obtidos demonstram que os objetivos propostos foram alcançados.

Identificou-se que a resistência ao escoamento e a tenacidade são as propriedades críticas a serem melhoradas devido ao acúmulo de tensões devido a geometria estriada. Os tratamentos térmicos de têmpera seguida de revenimento mostraram-se adequados para modificar simultaneamente essas propriedades.

Foram executados quatro conjuntos de tratamentos térmicos variando os meios de resfriamento (água e óleo) e as temperaturas de revenimento (425°C e 540°C). A têmpera foi realizada a 870°C por 1 hora em todas as condições, permitindo avaliar isoladamente o efeito da taxa de resfriamento e da temperatura de revenimento nas propriedades finais do material.

Os ensaios de tração revelaram que as amostras submetidas apenas à têmpera (Amostras 2 e 4) apresentaram elevada resistência mecânica, porém com perda crítica de ductilidade e alta fragilidade. A Amostra 3 (têmpera em água + revenimento a 540°C) demonstrou aumento de 54% a 45% na resistência ao escoamento e à tração, mantendo alongamento próximo ao material de referência. A Amostra 5 (têmpera em óleo + revenimento a 425°C) alcançou os maiores incrementos de resistência (89% no escoamento, e 76% na tração), porém com redução de 24% na ductilidade.

Os ensaios de dureza confirmaram que as amostras temperadas sem revenimento atingiram os valores mais elevados, enquanto as amostras revenidas apresentaram valores intermediários com boa reproduzibilidade, evidenciada por desvio padrão inferior a $\pm 1,5$ HRC. A Amostra 3 apresentou dureza média de 31,5 HRC e a Amostra 5, 39,5 HRC.

A análise por microscopia óptica validou os resultados dos ensaios mecânicos. A Amostra 3 apresentou microestrutura homogênea composta por matriz ferrítica com carbonetos precipitados de cementita, resultado da decomposição

completa da martensita durante o revenimento. A Amostra 5 apresentou microestrutura heterogênea com martensita revenida e bainita, explicando a maior dureza e menor ductilidade observadas.

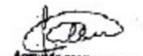
Com base nos critérios de resistência ao escoamento elevada, tenacidade adequada, reproduzibilidade dos resultados e dureza máxima de 32 HRC, a Amostra 3 apresentou a melhor relação entre resistência e tenacidade para a aplicação no semieixo vazado. O tratamento recomendado consiste em têmpera em água a 870°C seguida de revenimento a 540°C.

Conclui-se que o objetivo geral foi atingido, havendo sido determinada uma rota de tratamento térmico que otimiza as propriedades mecânicas do aço SAE 4130 para a aplicação específica no veículo Baja SAE, proporcionando aumento significativo de resistência com manutenção da tenacidade necessária para a vida útil do componente.

Para trabalhos futuros, recomenda-se explorar temperaturas de revenimento intermediárias entre 425°C e 540°C para otimizar ainda mais o equilíbrio entre propriedades, bem como realizar a validação em campo para confirmar o desempenho do componente nas condições reais de competição.

6 ANEXOS

Anexo A

ACOS F. SACCELLI LTDA. AVENIDA NARAIN SING, 205 - BONSUCESO - GUARULHOS - SP CEP: 07250-000 - Fone: 1124802299 - Fax: 1124801618 CNPJ: 01.471.173/0001-82 I.E.: 336201541115										CERTIFICADO DA QUALIDADE DO MATERIAL <small>(QUALITY CERTIFICATE OF MATERIAL)</small> CQM Nº 026130 REV.0 Emissão 10/04/2014 <small>Nossa Referência: 160244-01 FL.01</small>																											
Cliente (Customer) INTELL PARTS E SERVICES LTDA EPP																																					
Material Soltado (Screwed) 2 PÇ SAE 4130 MOD RL 31,75 MM X 300 CM										Qnt. Kg	Órgão Not.	Lote/Nº	Confid./Nº	Referência do Cliente (Customer Ref.)																							
										48,0	16024401A	61492 292187		CONFIRMLE-MAIL 01/04																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>Mn</th> <th>Si</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>N</th> <th>CU</th> <th>V</th> <th>Nb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.310</td> <td>0.530</td> <td>0.300</td> <td>0.011</td> <td>0.008</td> <td>0.950</td> <td>0.350</td> <td>0.230</td> <td>0.018</td> <td>0.000</td> <td>0.007</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	CU	V	Nb	0.310	0.530	0.300	0.011	0.008	0.950	0.350	0.230	0.018	0.000	0.007					
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	CU	V	Nb																										
0.310	0.530	0.300	0.011	0.008	0.950	0.350	0.230	0.018	0.000	0.007																											
<small>Informações Complementares (Remarks)</small>										SACCELLI ISO9001:2008 <small>Qualidade de Apoio</small>																											
										 <small>Emitido via Sistema (Inventar System) Usuário: 250</small>																											
										<small>Aprovado por Interventor José Carlos Telles-DTE</small>																											

Anexo A
 VALLOUREC. Aerotubos *et al.* Certificado de inspeção, 2022.

Anexo B

Table 2 Typical mechanical properties of heat-treated 4130 steel

Tempering temperature		Tensile strength		Yield strength		Elongation in 50 mm (2 in.), %	Reduction in area, %	Hardness, HB	Izod impact energy	
°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi				J	ft · lbf
Water quenched and tempered ^(a)										
205	400	1765	256	1520	220	10.0	33.0	475	18	13
260	500	1670	242	1430	208	11.5	37.0	455	14	10
315	600	1570	228	1340	195	13.0	41.0	425	14	10
370	700	1475	214	1250	182	15.0	45.0	400	20	15
425	800	1380	200	1170	170	16.5	49.0	375	34	25
540	1000	1170	170	1000	145	20.0	56.0	325	81	60
650	1200	965	140	830	120	22.0	63.0	270	135	100
Oil quenched and tempered ^(b)										
205	400	1550	225	1340	195	11.0	38.0	450	...	...
260	500	1500	218	1275	185	11.5	40.0	440	...	...
315	600	1420	206	1210	175	12.5	43.0	418	...	...
370	700	1320	192	1120	162	14.5	48.0	385	...	...
425	800	1230	178	1030	150	16.5	54.0	360	...	...
540	1000	1030	150	840	122	20.0	60.0	305	...	...
650	1200	830	120	670	97	24.0	67.0	250	...	...

Anexo B

ASM HANDBOOK COMMITTEE (coord.). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.* [S. I.]: ASM International, 1990. v. 1. ISBN 978-1-62708-161-0.

Anexo C

TABELA DE EQUIVALÊNCIA DE DUREZAS, CONFORME ASTM E140

DUREZA ROCKWELL ESCALA C 150g CONE DE DIAMANTE	DUREZA VICKERS PIRAMIDE DE DIAMANTE	DUREZA BRINELL			DUREZA ROCKWELL			DUREZA ROCKWELL SUPERFICIAL			(HS) NÚMERO DE DUREZA SHORE	RESISTÊNCIA APROXIMADA N/mm ²	DUREZA ROCKWELL ESCALA C 150kg CONE DE DIAMANTE
		ESFERA PADRÃO 10mm	ESFERA HULSTEN 30mm	ESFERA DE METAL DURO 10mm	(HRB) ESCALA A 60kg CONE DE DIAMANTE	(HRD) ESCALA B 100kg ESFERA DE 1/16 POL.	(HRD) ESCALA D 200kg CONE DE DIAMANTE	15N	30N	45N			
68	940				85.6		76.9	93.2	84.4	75.4	97		68
67	900				85.0		76.1	92.9	83.6	74.2	95		67
66	865				84.5		75.4	92.5	82.8	73.3	92		66
65	832			739	83.9		74.5	92.2	81.9	72.0	91		65
64	800			722	83.4		73.8	91.8	81.1	71.0	88		64
63	772			705	82.8		73.0	91.4	80.1	69.9	87		63
62	746			688	82.3		72.2	91.1	79.3	68.8	85		62
61	720			670	81.8		71.5	90.7	78.4	67.7	83		61
60	697	613	654	61.2		70.7	90.2	77.5	66.6	81			60
59	674	599	634	80.7		69.9	89.8	76.6	65.5	80			59
58	653	587	615	80.1		69.2	89.3	75.7	64.3	78			58
57	633	575	595	79.6		68.5	88.9	74.8	63.2	76			57
56	613	561	577	79.0		67.7	88.3	73.9	62.0	75			56
55	595	546	560	78.5		66.9	87.9	73.0	60.9	74	2079		55
54	577	534	543	78.0		66.1	87.4	72.0	59.8	72	2010		54
53	560	519	525	77.4		65.4	86.9	71.2	58.6	71	1952		53
52	544	500	508	51.2	76.8		64.6	86.4	70.2	57.4	69	1883	52
51	528	487	494	496	76.3		63.8	85.9	69.4	56.1	68	1824	51
50	513	475	481	481	75.9		63.1	85.5	68.5	55.0	67	1755	50
49	498	464	469	469	75.2		62.1	85.0	67.6	53.8	66	1687	49
48	484	451	455	455	74.7		61.4	84.5	66.7	52.5	64	1638	48
47	471	442	443	443	74.1		60.8	83.9	65.8	51.4	63	1579	47
46	458	432	432	432	73.6		60.0	83.5	64.8	50.3	62	1530	46
45	446	421	421	421	73.1		59.2	83.0	64.0	49.0	60	1481	45
44	434	409	409	409	72.5		58.5	82.5	63.1	47.8	58	1432	44
43	423	400	400	400	72.0		57.7	82.0	62.2	46.7	57	1383	43
42	412	399	399	399	71.5		56.9	81.5	61.3	45.5	56	1334	42
41	402	381	381	381	70.9		56.2	80.9	60.4	44.3	55	1294	41
40	392	371	371	371	70.4		55.4	80.4	59.5	43.1	54	1245	40
39	382	362	362	362	69.9		54.6	79.9	58.6	41.9	52	1216	39
38	372	353	353	353	69.4		53.8	79.4	57.7	40.8	51	1177	38
37	363	344	344	344	68.9		53.1	78.8	56.8	39.6	50	1157	37
36	354	336	336	336	68.4	(109.0)	52.3	78.3	55.9	38.4	49	1118	36
35	345	327	327	327	67.9	(108.5)	51.5	77.7	55.0	37.2	48	1079	35
34	336	319	319	319	67.4	(108.0)	50.8	77.2	54.2	36.1	47	1059	34
33	327	311	311	311	66.8	(107.5)	50.0	76.6	53.3	34.9	46	1030	33
32	318	301	301	301	66.3	(107.0)	49.2	76.1	52.1	33.7	44	1000	32
31	310	294	294	294	65.8	(106.0)	48.4	75.6	51.3	32.5	43	981	31
30	302	286	286	286	65.3	(105.5)	47.7	75.0	50.4	31.3	42	951	30
29	294	279	279	279	64.7	(104.5)	47.0	74.5	49.5	30.1	41	932	29
28	286	271	271	271	64.3	(104.0)	46.1	73.9	48.6	28.9	41	912	28
27	279	264	264	264	63.8	(103.0)	45.2	73.3	47.7	27.8	40	883	27
26	272	258	258	258	63.3	(102.5)	44.6	72.8	46.8	26.7	38	863	26
25	266	253	253	253	62.8	(101.5)	43.8	72.2	45.9	25.5	38	843	25
24	260	247	247	247	62.4	(101.0)	43.1	71.6	45.0	24.3	37	824	24
23	254	243	243	243	62.0	100.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36	804	23
22	248	237	237	237	61.5	99.0	41.6	70.5	43.2	22.0	35	785	22
21	243	231	231	231	61.0	98.5	40.9	69.9	42.3	20.7	35	775	21
20	238	226	226	226	60.5	97.8	40.1	69.4	41.5	19.6	34	755	20
(18)	230	219	219	219		96.7					33	736	(18)
(16)	222	212	212	212		95.5					32	706	(16)
(14)	213	203	203	203		93.9					31	677	(14)
(12)	204	194	194	194		92.3					29	647	(12)
(10)	195	187	187	187		90.7					28	618	(10)
98	188	179	179	179		89.5					27	598	98
96	180	171	171	171		87.1					26	579	96
(4)	173	165	165	165		85.5					25	549	(4)
(2)	166	158	158	158		83.5					24	530	(2)
(0)	160	152	152	152		81.7					24	520	(0)

Na tabela acima, valores entre parênteses não são comumente usados.
Escalas Rockwell A, C e D são usados com penetrador de diamante.

Anexo C
ITARAÍ TRATAMENTO TÉRMICOS CLARO E OBJETIVO (Osasco - SP). Tabela de equivalência de durezas, conforme ASTM E140. [S. I.], 12 2016. Disponível em:
<https://www.itarai.com.br/files/E.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK COMMITTEE (coord.). Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. [S. I.]: ASM International, 1990. v. 1. ISBN 978-1-62708-161-0.

AMERICAN WELDING SOCIETY (United States of America). Welding Handbook Committee. Welding Handbook: Materials and applications, Part 1. 9 ed. United States of America: American Welding Society, 2011. v. 4. ISBN 978-0-87171-759-7.

BEER, Ferdinand P. *et al.* Mecânica dos materiais. 5^a. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. ISBN 978-85-8055-008-5.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. Elementos de máquinas de Shigley. 10^a ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. ISBN 978-85-8055-555-4.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia mecânica. 2^a ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 3.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos. 4^a. ed. rev. e atual. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. ISBN 978-85-212-0449-7.

HEIDARY, O. *et al.* UP-quenched SAE 4130 steel: Mechanical properties assessment and bainite formation. Elsevier: Materials Science & Engineering, [s. l.], 2020.

ITARAÍ TRATAMENTO TÉRMICOS CLARO E OBJETIVO (Osascp - SP). Tabela de equivalência de durezas, conforme ASTM E140. [S. I.], 12 2016. Disponível em: <https://www.itarai.com.br/files/E.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. SOLDAGEM: Fundamentos e Tecnologia. 3^a. ed. atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

NORTON, Robert L. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-85-8260-023-8.

OLIVEIRA, Rafael César Lamim Martins de *et al.* Análise comparativa entre têmpera e partição versus a têmpera e revenimento para o aço 4340. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 24, ed. 3, 2019.

RESEARCH LABORATORY (USA). United States Steel Company. Atlas of isothermal transformation diagrams. [S. l.: s. n.], 1951.

SAE BRASIL. RATBSB. Emenda 5. Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil, 1 ago. 2023. Disponível em: http://arquivos.saebrasil.org.br/2023/Baja/RATBSB_emenda_05.pdf. Acesso em: 8 dez. 2023.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. 3^a ed. rev. e atual. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001. Disponível em: <https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/ppgcb/files/2011/03/Metodologia-da-Pesquisa-3a-edicao.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2023.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J404: Chemical Compositions of SAE Alloy Steels. Warrendale, PA, 2009.

SOUZA, Sérgio Augusto de. Ensaios mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1982.

VALLOUREC. Aerotubos *et al.* Certificado de inspeção, 2022.