

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE.  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO.  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE.

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E  
MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 1045 SUBMETIDO A  
TRATAMENTO TÉRMICO

Autora: Wenslainy Rodrigues Nunes  
Orientador: Dr. Idalci Cruvinel dos Reis

Rio Verde – GO  
Junho - 2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE.  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO.  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE.

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E  
MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 1045 SUBMETIDO A  
TRATAMENTO TÉRMICO

Autora: Wenslainy Rodrigues Nunes  
Orientador: Dr. Idalci Cruvinel dos Reis

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Tecnologia e Ciência dos Materiais.

Rio Verde – GO  
Junho - 2020

# FICHA CATALOGRAFICA

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

Nunes, Wenslainy Rodrigues

Caracterização Estrutural e Microestrutural do aço SAE 1045 submetido a tratamento térmico / Wenslainy Rodrigues Nunes; orientador Idalci Cruvinel dos Reis; co-orientador Warley Augusto Pereira. Rio Verde, 2020.

65 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) - Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

1. têmpera. 2. revenimento. 3. ensaios mecânicos. 4. microscopia. I. Cruvinel dos Reis, Idalci, orient. II. Augusto Pereira, Warley, co-orient. III. Título.



**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                      | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: Wenslainy Rodrigues Nunes

Matrícula: 2018102331440101

Título do Trabalho: Caracterização Estrutural e Microestrutural do aço SAE 1045 submetido a tratamento térmico.

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: Publicação

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: \_\_/\_\_/\_\_

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde - GO , 26/08/2020  
Local Data

*Wenslainy Rodrigues Nunes*

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

*Isabela Cristina dos Reis*

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 17/2020 - GGRAD-RV/DE-RV/DG-RV/CMPRV/IFGOIANO

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 1045 SUBMETIDO A  
TRATAMENTO TÉRMICO

Autora: Wenslainy Rodrigues Nunes

Orientador: Dr. Idalci Cruvinel dos Reis

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia  
Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 26 de junho de 2020.

**Prof. Dr. Victor Ciro Solano**  
Reynoso  
Avaliador externo - Unesp / Ilha  
Solteira

**Prof. Dr. Bacus de Oliveira**  
Nahime  
Avaliador interno - IF Goiano /  
Rio Verde

**Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis**  
Presidente da Banca - IF Goiano / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Victor Ciro Solano Reynoso, PROFESSOR AVALIADOR DE BANCA**, em 26/06/2020 12:45:16.
- **Bacus de Oliveira Nahime, PROFESSOR ENS BASICO TECH TECNOLOGICO**, em 26/06/2020 12:30:43.
- **Idalci Cruvinel dos Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECH TECNOLOGICO**, em 26/06/2020 12:16:25.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/06/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse  
<https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 154641

Código de Autenticação: 73c15f52c6



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
Campus Rio Verde  
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3620-5600

Aos meus pais Edite Rodrigues Nunes e Wagno Alves Nunes,  
às minhas irmãs Kamilla Rodrigues Nunes e Ludymila Rodrigues Nunes,  
ao meu esposo Washington Furquim de Souza,

**OFEREÇO**

Ao meu maior exemplo,  
Edite Rodrigues Nunes,

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, por estar sempre presente em cada detalhe, pela oportunidade de fazer um mestrado, aprender coisas essenciais para a minha profissão e me fortalecer nos dias de dificuldade, tornando minha fé ainda maior, inabalável e por não permitir que eu desista nunca;

Aos meus pais Edite e Wagno, principalmente à minha mãe, que sempre incentivou e nunca me deixou desistir dos meus objetivos e sonhos; às minhas irmãs e amigas, Kamilla e Ludymila, que sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos meus avós Joaquim, Lázara (in memoriam), Alzira e Ariston, que são meus maiores exemplos de amor e cuidado.

Ao meu esposo Washington, pelo seu companheirismo, apoio, carinho, paciência, compreensão, amor e por ser a minha calma em meio à angústia e ao desespero.

Ao meu orientador, Dr. Idalci Cruvinel dos Reis, pela paciência, pela contribuição na minha formação profissional e pela orientação neste trabalho.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, por compartilharem seus conhecimentos.

Ao meu coorientador, Dr. Warley Augusto Pereira, por toda a ajuda, desde a escolha do tema até a finalização desta pesquisa, minha eterna gratidão e admiração.

À Universidade de Rio Verde, pela disponibilização dos laboratórios para o desenvolvimento deste trabalho.

Às colegas de mestrado, Nájela e Mariana, pelos momentos que dividimos de angústias e de alegrias principalmente.

Ao diretor de pesquisa e Pós-Graduação, e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, por proporcionarem a oportunidade de cursar o mestrado.

Enfim, meu agradecimento a todos aqueles que contribuíram para concretizar esse sonho.

## **BIOGRAFIA DA AUTORA**

Wenislainy Rodrigues Nunes, natural da cidade de Rio Verde, Goiás, nascida em 16 de junho de 1993, filha de Wagno Alves Nunes e Edite Rodrigues Nunes. Concluiu o ensino médio no Colégio Estadual Hermínio Rodrigues Leão, na cidade de Santo Antônio da Barra, Goiás. Concluiu o curso Técnico em Administração em 2010, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde. Graduada em Engenharia Mecânica pela Universidade de Rio Verde em 2015. Em 2018, ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Em junho de 2020, defendeu sua dissertação, parte indispensável para a obtenção do título de Mestre.

## ÍNDICE GERAL

	Página
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.2. Estrutura Cristalina .....	18
1.2.1. Tipos De Aços .....	19
1.3. Diagrama de Fases .....	22
1.4. Diagrama TTT .....	24
1.5. Tratamento Térmico .....	25
1.5.1. Recozimento .....	26
1.5.2. Normalização .....	26
1.5.3. Têmpera .....	27
1.5.4. Revenimento .....	29
1.6. Propriedades Mecânicas dos Aços.....	30
1.7. Ensaio de Dureza .....	30
1.7.1. Dureza Rockell .....	31
1.8. Ensaio de Tração.....	31
1.9. Microscopia .....	31
1.9.1. Microscopia Ótica.....	32
1.9.2. Microscopia Eletrônica de Varredura .....	32
1.10. Sustentabilidade .....	33
1.11. Análise de Variância .....	33
1.12. Justificativa .....	35
1.13. Material e Programa Experimental .....	35
1.13.1. Material.....	35
1.13.2. Metodologia .....	37
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>38</b>
2.1. Objetivo Geral.....	38
2.2. Objetivo Específico.....	38
2.3. Referências Bibliográficas .....	39
<b>3. CAPÍTULO I.....</b>	<b>41</b>
3.1. Introdução .....	43
3.1.1. Justificativa .....	44
3.2. Material e Programa Experimental .....	44
3.2.1. Material.....	44
3.2.2. Metodologia .....	46
3.3. Resultados e Discussões .....	47
3.3.1. Ensaio de Dureza .....	47
3.3.2. Análise de Variância.....	49
3.4. Microscopia Ótica.....	53
3.5. Microscopia Eletrônica de Varredura .....	55

3.6. Conclusões .....	61
<b>4. CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>64</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>Página</b>
<b>Tabela 1-</b> Teor de carbono no aço e suas características. ....	20
<b>Tabela 2-</b> Análise de variância para dois fatores .....	34
<b>Tabela 3-</b> Composição química em porcentagem em peso de aço 1045. ....	35
 <b>CAPITULO I: CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 1045 SUBMETIDO A TRATAMENTO TÉRMICO</b>	
<b>Tabela 1-</b> Composição química em porcentagem em peso de aço 1045 .....	45
<b>Tabela 2-</b> Valores de dureza médios em função do meio de resfriamento, tempo e temperatura de austenitização .....	48
<b>Tabela 3-</b> Valores de dureza médio para verificação da influência do tempo e da temperatura de revenimento sobre a dureza do aço SAE 1045 (valores de dureza em HRC).....	48
<b>Tabela 4-</b> Análise de variância da primeira etapa. ....	49
<b>Tabela 5-</b> Análise de variância da segunda etapa. ....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

INTRODUÇÃO	Página
<b>Figura 1-</b> Representação esquemática da variação da estrutura cristalina com a temperatura .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 19
<b>Figura 2-</b> Martensita do tipo a) Massiva; b) Acicular e c) composta por presença de ferrita região clara e perlita região escura.....	22
<b>Figura 3-</b> Diagrama de fase Fe-C para aços hipoeutetóides .....	23
<b>Figura 4-</b> Diagrama de transformação - tempo - temperatura TTT .....	24
<b>Figura 5-</b> Formação da perlita (ferrita + cementita) a partir do resfriamento lento.....	28
<b>Figura 6-</b> Esquema da estrutura cristalina do ferro durante a transformação CFC para CCC para a obtenção de estrutura TCC correspondente à martensita.....	28
<b>Figura 7-</b> Demonstração do revenimento no diagrama TTT .....	29
<b>CAPITULO I: CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 1045 SUBMETIDO A TRATAMENTO TÉRMICO</b>	
<b>Figura 1-</b> Fluxograma da preparação das amostras de aço para microscopia.....	46
<b>Figura 2-</b> Superfície de resposta da relação: meio de resfriamento x Temperatura de austenitização x dureza. ....	50
<b>Figura 3-</b> Superfície de resposta da relação: Tempo de austenitização x meio de resfriamento x dureza.....	51
<b>Figura 4-</b> Superfície de resposta da relação: Tempo de austenitização x temperatura de austenitização x dureza .....	51
<b>Figura 5-</b> Superfície de resposta da relação: Dureza, temperatura de revenimento e tempo .....	53
<b>Figura 6-</b> Micrografias de aço SAE 1045 sem tratamento térmico (amostra de controle), ataque com Nital 3%, ampliação de 400x.....	54
<b>Figura 7-</b> Micrografias de aço SAE 1045, temperado e resfriado em água, a 900°C por 9 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 400x.....	54

<b>Figura 8-</b> Micrografias de aço SAE 1045, temperado e resfriado em salmoura, a 875°C por 15 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 400x.....	55
<b>Figura 9-</b> Micrografias do MEV: amostra de controle sem tratamento térmico, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.....	55
<b>Figura 10-</b> Micrografias do MEV: aço SAE 1045 temperado e resfriado em água, a 900 °C por 9 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x. ....	56
<b>Figura 11-</b> Micrografias do MEV: aço SAE 1045 temperado e resfriado em salmoura, a 875 °C por 15 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x .....	57
<b>Figura 12-</b> Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 250°C por 20 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.....	57
<b>Figura 13-</b> Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 325°C por 20 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.....	58
<b>Figura 14-</b> Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 400°C por 20 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.....	58
<b>Figura 15-</b> Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 250°C por 30 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.....	59
<b>Figura 16-</b> Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 325°C por 30 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x .....	60
<b>Figura 17-</b> Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 400°C por 30 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo / Sigla	Significado
P	Fósforo
Al	Alumínio
C	Carbono
Mg	Magnésio
S	Enxofre
Si	Silício
Cr	Cromo
Mo	Molibdênio
Al	Alumínio
Ti	Titânio
Fe	Ferro
Mn	Manganês
ANOVA	Análise de Variância
SQ	Soma Quadrática
GL	Grau de Liberdade
MQ	Média Quadrática
$F_{0\text{ CAL}}$	Fatores Calculados
$F_{0\text{ TAB}}$	Fatores Tabelados
p	Nível de significância
SAE	American Iron and Steel Institute
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
$\alpha$	Ferrita alfa
$\delta$	Ferrita delta
$\gamma$	Austenita
$\text{Fe}_3\text{C}$	Cementita
Fe-C	Ferro Carbono
CCC	Cubica de Corpo Centrado
CFC	Cubica de Face Centrada
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
TTT	Transformação- Tempo- Temperatura

---

ITT	Isothermal Time Transformation
CCT	Continuous Cooling Transformation
%p	Porcentagem de peso

---

## RESUMO

NUNES, WENISLAINY RODRIGUES. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro 2020. **Caracterização estrutural e microestrutural do aço SAE 1045 submetido a tratamento térmico.** Orientador: Idalci Cruvinel dos Reis. Coorientador: Warley Augusto Pereira.

Como objeto de investigação para o presente estudo, utilizou-se o aço SAE 1045, por ser um aço com médio teor de carbono, ter ampla utilização, porém possui propriedades mecânicas limitadas para aplicações severas. Este estudo se justifica pela necessidade de melhora de propriedades do material, ampliando o leque de aplicações. O objetivo desta pesquisa é compreender o efeito do tempo e da temperatura de austenitização e do método de resfriamento e suas implicações sobre a dureza do aço SAE 1045. Diante disso, a têmpera e o revenimento foram tratamentos térmicos utilizados. O tratamento térmico modifica a estrutura cristalina do aço, melhorando suas propriedades mecânicas e aliviando tensões. Para o desenvolvimento experimental, os meios de resfriamento usados para a têmpera foram água e salmoura, e as temperaturas determinadas 850°C, 875°C e 900°C, com o objetivo de obter estrutura martensítica e a máxima dureza do aço. No revenimento o meio de resfriamento foi ao ar livre em temperatura ambiente, e as temperaturas de aquecimento determinadas foram 250°C, 325°C e 400°C, com a finalidade de diminuir a dureza excessiva da martensita e tornar o aço mais tenaz e dúctil. O ensaio de dureza confirmou a presença de martensita assim como a microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura nas amostras temperadas. Já nas amostras revenidas apareceram microconstituintes que melhoram a tenacidade e ductilidade como ferrita bainítica e austenita retida. A análise de variância não teve nível de significância de 5% na primeira fase de experimentos, mas na segunda fase obteve. Na investigação da microestrutura, aplicou-se a microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura que apontaram melhora na microestrutura no material. Realizou-se o ensaio de tração nas amostras, no entanto sem êxito.

**PALAVRAS-CHAVE:** Têmpera. Revenimento. Ensaio de dureza. Microscopia. Análise de Variância.

## ABSTRACT

NUNES, WENISLAINY RODRIGUES. Federal Institute Goiano, Rio Verde – GO Campus, February 2020. **Structural and microstructural characterization of SAE 1045 steel subjected to heat treatment.** Advisor: Idalci Cruvinel dos Reis. Co-advisor: Warley Augusto Pereira.

As the object of investigation for the present study, SAE 1045 steel was used, as it is a steel with medium carbon content, having wide use, however it has limited mechanical properties for severe applications. This study is justified by the need to improve material properties, expanding the applications range. The aim of this research is to understand the effect of austenitizing time and temperature as well as the cooling method and its implications on the SAE 1045 steel hardness. In view of this, quenching and tempering were used as thermal treatments. For the experimental development, the cooling medium used for quenching were water and brine, and the temperatures determined were 850°C, 875°C and 900°C, with the objective of obtaining martensitic structure and the maximum steel hardness. In tempering, the cooling medium was outdoors at ambient temperature, and the heating temperatures determined were 250°C, 325°C and 400°C, in order to reduce the excessive hardness of the martensite and make the steel more tenacious and ductile. The hardness test confirmed the presence of martensite as well as optical microscopy and scanning electron microscopy in the tempered samples. In the tempered samples, microconstituents appeared, which improve toughness and ductility such as bainitic ferrite and retained austenite. The analysis of variance did not have a significance level of 5% in the first phase of experiments, but in the second phase it was observed. In the microstructure investigation was applied optical microscopy and scanning electron microscopy, which showed improvement in the microstructure of the material. The traction test was carried out on samples, however it was unsuccessful.

**KEYWORDS:** Quenching. Tempering. Hardness test. Microscopy. Analysis of variance.

## 1. INTRODUÇÃO

Aços têm aplicações em diversas áreas, na mecânica em peças, ferramentas, maquinários, na construção civil, em estruturas de casas e prédios, na fabricação de tubos, na indústria naval, utensílios domésticos, apresentando uma grande funcionalidade, no entanto, em muitos casos, os aços necessitam ser reforçados com elementos de liga que os tornam mais resistentes ou com tratamentos térmicos que mudam sua microestrutura, modificando suas propriedades mecânicas sem alterar sua composição química.

O estudo dos aços é fundamental para o desenvolvimento em um âmbito geral, desde um simples talher de cozinha, em motores de geladeiras e ar condicionado ou na utilização de próteses ósseas. Além disso, o aço vem substituindo a madeira na construção civil por ser um material mais resistente, seguro, reduz o custo da obra e diminui consideravelmente o tempo para ser finalizada.

O metal é um dos materiais mais antigos existentes no planeta, grandemente utilizado. Nesse sentido, a reciclagem se faz importantíssima, pois a sucata do aço pode ser modificada, assim como sua microestrutura, sem perda da qualidade. O aço é um material 100% aproveitado e reutilizado. Por meio da reciclagem, ocorre uma imensa redução dos resíduos metálicos que demoram um longo tempo para sua total decomposição, reduzindo os impactos ambientais que causam.

Logo, com a compreensão e a relevância da utilização e reutilização do aço, introduz-se o tratamento térmico como forma de melhoria das propriedades microestruturais, podendo alterá-la, tornando o aço mais ou menos dúctil, tenaz, resistente e frágil, amplificando sua utilização. Em razão da alta temperatura, a que o aço é submetido, ocorre um rearranjo cristalino que altera os microconstituintes encontrados no material, de acordo com a temperatura a que ele é submetido e o meio de resfriamento adotado. Normalmente, são empregados mais de um tratamento térmico nos aços, sendo os mais utilizados a têmpera, revenimento, normalização e recozimento. Ressalta-se que não modificam a composição química do aço.

Para a correta realização dos tratamentos térmicos, são necessários conhecimentos do diagrama de fases (Fe-C), que mostram todas as fases e os microconstituintes existentes no aço, e curvas TTT (transformação - tempo -

temperatura), que ajudam a identificar as fases que o material pode adquirir após o término de todo o processo.

Para verificar as características oriundas do tratamento térmico, existem ensaios mecânicos capazes de mostrar a dureza do aço, como o ensaio de dureza, nas escalas principais Brinell, Rockwell e Vickers. Outro ensaio significativo é o de tração, pois mostra a resistência do material, tensão, deformação, elasticidade e plasticidade.

Finalmente, para análise do aço tratado, é importante a preparação das amostras para a microscopia, que envolve um processo de embutimento, lixamento, polimento, ataque químico e, só após, são concluídas a microscopia ou as demais análises que se deseja fazer.

## **1.1 Aços**

O minério de ferro é encontrado em abundância na crosta terrestre. Após a extração, é levado à siderurgia, passando por um longo processo até sua utilização, quando é levado ao alto-forno. O ferro sai deste forno em forma líquida e recebe o nome de ferro-gusa, que contém ainda em sua composição muitas impurezas e carbono, que são diminuídos por aplicações de oxigênio em um conversor, sendo então transformados em ligas de Fe-C, podendo se tornar aço ou ferro fundido, de acordo com o percentual de carbono. Além da extração do minério de ferro na natureza, o aço é um material sustentável, pois a sucata do aço é processada novamente e reutilizada completamente sem perda da qualidade [1].

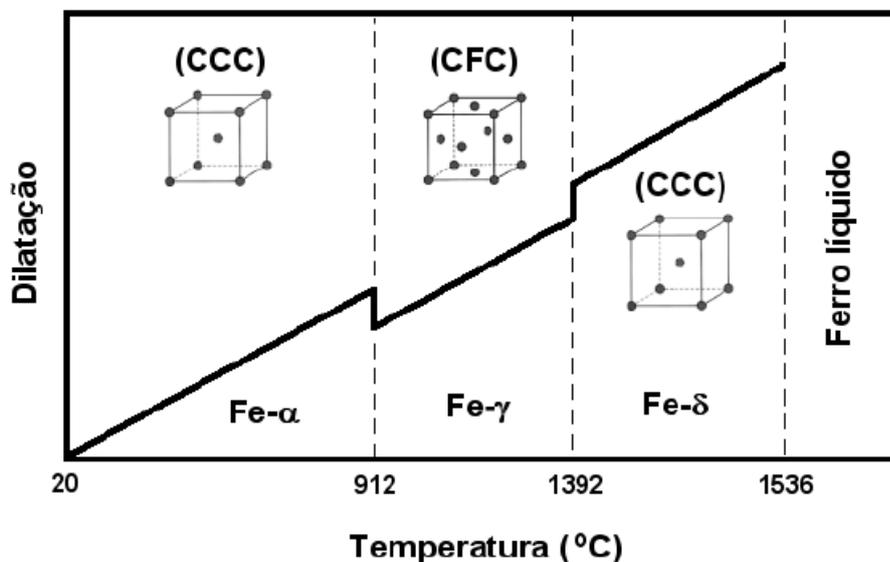
O processamento, tanto do minério quanto da sucata, é economicamente vantajoso, visto ter baixo custo em relação a outras ligas e apresentar uma variação imensa em suas propriedades mecânicas, tanto com adição de outros elementos quanto na utilização de tratamentos térmicos [1].

## **1.2 Estrutura Cristalina**

O ferro é um elemento químico alotrópico, ou seja, tem mais de uma estrutura cristalina, dependendo da temperatura. Os aços têm estrutura cristalina constituída por átomos organizados [2].

O aço passa por várias fases e, com isso, sua estrutura cristalina é modificada de acordo com a temperatura em que se encontra. A forma como é resfriado quando está

em altas temperaturas também influencia na sua microestrutura. Numa temperatura de 1538°C, o aço apresenta estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) e a fase é delta; ao chegar à temperatura de 1394°C, a estrutura se modifica e passa a ser cúbica de face centrada (CFC) em razão de um rearranjo atômico e a fase passa a ser gama. Decaindo ainda a temperatura a 912°C, novamente com a mudança dos átomos, a estrutura volta a ser cúbica de corpo centrado (CCC), e a fase passa a ser alfa. Quando chega à temperatura, chamada ponto de Curie, 768°C, o ferro passa a ser magnético, mas permanece na mesma fase e estrutura, isso tudo devido às reações exotérmicas e endotérmicas, ou seja, liberação e sucção de calor [2]. A Figura 1 mostra com maior clareza a representação esquemática da variação da estrutura cristalina com a temperatura [3].



**Figura 1 - Representação esquemática da variação da estrutura cristalina com a temperatura.**

No estudo dos aços, as estruturas mais relevantes são as cúbicas de corpo centrado (CCC), cúbicas de face centrada (CFC) e tetragonal de corpo centrado (TCC), sendo que a célula unitária se transforma em TCC normalmente quando a microestrutura é composta por martensita. As estruturas atômicas dos aços são representadas em formas de cubos e os átomos, em esferas [2].

### 1.2.1 Tipos de aços

De acordo com (Tschiptschin [4]), os aços podem ser divididos em três categorias: os aços carbono, aços baixa liga e aços alta liga. Entre eles, o aço carbono apresenta a maior produção mundial, que chega a 90%, nessa subcategoria entram os aços baixo teor de carbono, médio teor de carbono e alto teor de carbono.

Os aços carbono podem ser divididos de acordo com o teor de carbono, conforme mostrado pela Tabela 1 [5].

**Tabela 1** – Teor de carbono no aço e suas características [5].

<b>Teor de Carbono</b>	<b>Nome e características</b>
<b>Menos de 0,15%p</b>	Aço extra doce (Muito baixo teor de C)
<b>0,15 a 0,25%p</b>	Aço doce (Baixo teor de C)
<b>0,25 a 0,40%p</b>	Aço meio doce (Médio teor de C)
<b>0,40 a 0,60%p</b>	Aço meio duro (Alto teor de C)
<b>0,60 a 0,80%p</b>	Aço duro (Muito alto teor de C)
<b>Acima de 0,80%p</b>	Aço extra duro (Extra alto teor de C)

O aço SAE 1045 tem um excelente custo-benefício, boa resistência mecânica, é muito utilizado na fabricação de componentes de uso geral, apresenta uma temperabilidade baixa, com pouca penetração de dureza na seção transversal e, quando tratado termicamente, é aumentada sua aplicabilidade [6]. Por meio do tratamento térmico, pode ter a microestrutura modificada e melhorada, dependendo do tipo de uso. Caso seja submetido a trabalhos mecânicos excessivos e de grande desgaste, deve-se aumentar a resistência mecânica. Para isso, são aplicados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, que trarão a resistência mecânica necessária, corrigindo a dureza excessiva proveniente da têmpera. Por outro lado, se desejar um aço para usinagem, há outros tratamentos térmicos para torná-lo mais dúctil para o trabalho a frio [7].

O ferro e o carbono são elementos determinantes desta liga. A presença do carbono torna-o um material com grande aplicabilidade industrial, abrangendo e modificando seus microconstituintes de acordo com as propriedades desejadas. As ligas Fe-C apresentam quantidade de 0,008%p até cerca de 2,14%p de carbono e demais elementos como o manganês, fósforo e enxofre [8].

O aço tem estrutura cristalina com átomos em arranjos repetidos ligados entre si por longos espaços atômicos, formando um padrão tridimensional. Esses arranjos atômicos são subdivididos, sendo conhecidos como células unitárias, adotando formatos geométricos [9].

Os microconstituintes dos aços também têm grande relevância para este estudo, sendo eles, austenita ferrita, perlita, cementita, bainita e martensita.

A austenita apresenta forma estável acima de  $727^{\circ}\text{C}$ , em temperaturas inferiores encontra-se na forma de ferrita e cementita, apenas é encontrada como austenita em aços austeníticos, tornando-se estável em temperatura ambiente. A austenita é dúctil, mas tem grande resistência a desgaste, tem estrutura cúbica de face centrada e é não magnética [10].

A ferrita tem estrutura cúbica de corpo centrado, sua formação se inicia aproximadamente após a zona crítica e vai até uma temperatura de  $912^{\circ}\text{C}$  e é magnética. Entre todos os constituintes, é o mais dúctil e o mais tenaz e, na formação de perlita, mistura-se com a cementita [10].

A cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) é um carboneto de ferro. Apresenta uma fase metaestável, tem formação quando o limite de solubilidade do carbono na ferrita  $\alpha$  é abaixo de  $727^{\circ}\text{C}$ , muito dura, porém muito frágil. A cementita apresenta lamelas de ferrita e cementita, tendo também sua forma globular, que apresenta partículas similares a gotículas de água [9].

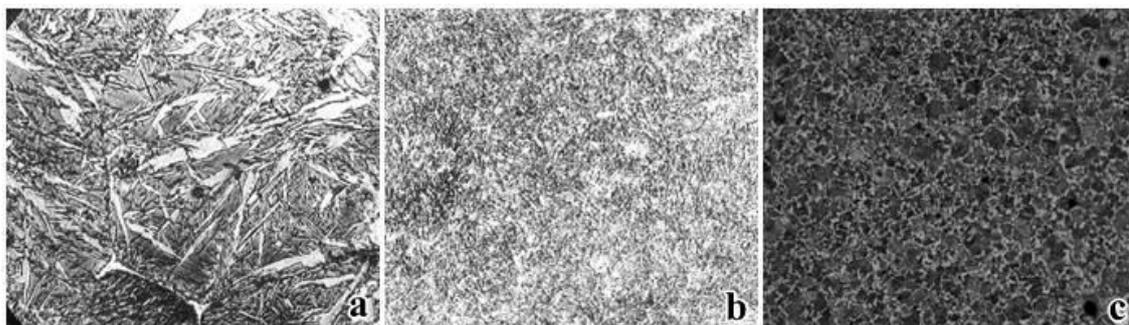
A perlita, instituída pela fusão entre ferrita e cementita, normalmente tem início a  $727^{\circ}\text{C}$ , tem dureza intermediária entre a da ferrita e da cementita. Pode ter formato laminar, reticular ou globular, podendo se subdividir em perlita fina, que apresenta menores taxas de difusão, com mais contornos de grãos e maior reforço da cementita, tendo, assim, maior dureza e resistência em relação à perlita grossa, pois as taxas de difusão neste caso são mais altas, podendo os átomos de carbono se difundir ao longo de distâncias mais longas [9].

A bainita é um constituinte bastante resistente e duro, porém não menos dura que a martensita. Existem dois tipos de bainita: a superior, que se forma como uma série de ripas bem finas de ferrita e cementita, e a bainita inferior, que ocorre em temperaturas mais baixas, entre  $200^{\circ}\text{C}$  e  $300^{\circ}\text{C}$ , em formato de agulhas, bem parecida com a martensita [9].

A martensita, ocasionada normalmente a partir de têmpera, é uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro, é um microconstituente do aço que apresenta

maior dureza, tem estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado. Há dois tipos de martensita, a massiva e a acicular, o que as difere é a porcentagem de carbono: a massiva tem teor de carbono de 0,6%p e a acicular vai de 0,6p a 1,0%p [11].

Na Figura 2, adaptação [11], [5] metalógrafa dos dois tipos de martensita: a primeira imagem representa a martensita massiva e a segunda, a acicular.



**Figura 2 - Martensita do tipo a) Massiva; b) Acicular e c) composta por presença de ferrita região clara e perlita região escura.**

O diagrama de equilíbrio Fe-C mostra tanto a microestrutura do aço quanto suas fases, que são a ferrita ( $\alpha$ ), a ferrita ( $\delta$ ), a austenita ( $\gamma$ ) e a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), que são essenciais para a compreensão e aplicação do tratamento térmico nos aços.

### 1.3 Diagrama de fases ferro carbono

Para um melhor entendimento desse processo, é importante conhecer o diagrama ferro carbono (FeC), em que é possível observar os tipos de aços, sendo eles os aços hipoeutetoides, eutetoides e hipereutetoides, e com isso as transformações de fases presentes no aço de acordo com as condições de pressão, temperatura e composição química. Desta forma, de acordo com Brunatto (2016), têm-se:

- Aços sem transformação eutetoide: teores de carbono até 0,021%p C, microestrutura formada por perlita e cementita;
- Aços hipoeutetoides: teores de carbono variando entre 0,02 e 0,76% p C, microestrutura formada por ferrita e perlita;
- Aço eutetoide: teor de carbono de 0,76%p C, composição química do ponto eutetoide, microestrutura formada por perlita; e
- Aços hipereutetoides: teores de carbono variando entre 0,76% e 2,14%p C, microestrutura formada por perlita e cementita.

As estruturas cristalinas também são abordadas nesse cenário, sendo mais comuns em aços, a estrutura cúbica de face centrada e cúbica de corpo centrado.

A Figura 3 mostra a representação do diagrama de fase Fe-C.

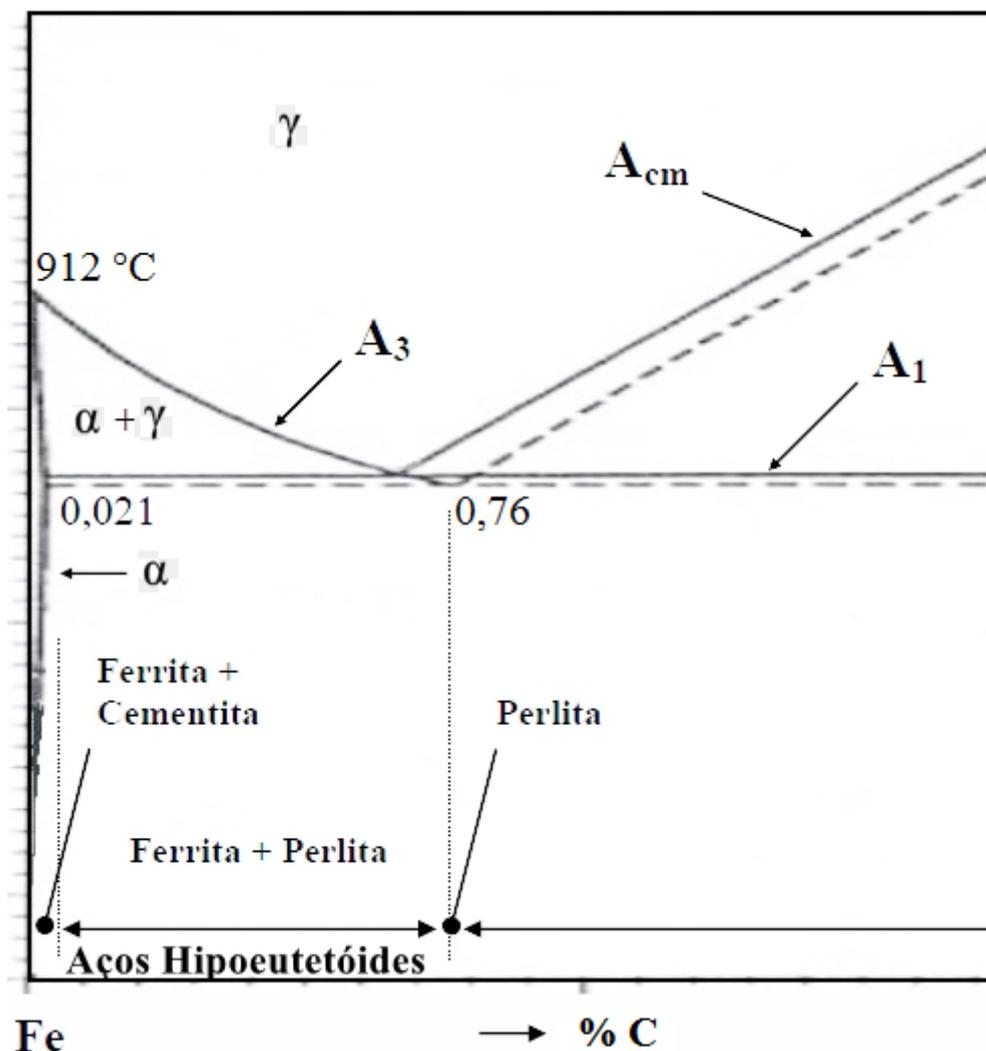


Figura 3 – Diagrama de fase Fe-C para aços hipoeutetóides adaptado [11].

O diagrama de fase Fe-C, como foi visto, mostra todas as fases do aço e seus microconstituintes, que neste sistema apresenta ligas de aço que, na temperatura ambiente e nas mesmas condições de equilíbrio, são duas fases: a fase cúbica de corpo centrado e a fase Fe<sub>3</sub>C [11]. Ainda de acordo com Brunatto (2016), as curvas A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub> e A<sub>cm</sub> também fazem parte do sistema Fe-C, sendo definidas como:

A<sub>1</sub> - Isoterma (linha na qual a temperatura se mantém constante) eutetoide a 727°C, que, em ligação com a curva A<sub>3</sub>, define a zona crítica;

A<sub>3</sub> - Por meio desta linha no diagrama de fase Fe-C, à medida que a temperatura vai diminuindo, ocorre a transformação de austenita ( $\gamma$ ) para ferrita ( $\alpha$ );

$A_{cm}$  – Responsável pela separação de transformação de fase; e

Zona Crítica – Após a temperatura  $727^{\circ}\text{C}$ , inicia-se a fase austenita, que não está presente nas outras fases abaixo desta temperatura.

## 1.4 Diagrama TTT

O diagrama de fases, como visto, identifica as fases e microconstituintes, não sendo possível visualizar o tempo de equilíbrio das transformações de fases, que tem grande importância para definir temperaturas de tratamentos térmicos e resfriamentos a serem adotados. Para isso, o diagrama TTT, Figura 4, revela essas transformações de tempo e temperatura. Pelas curvas, pode-se estimar o tempo para início e término das transformações de fase.

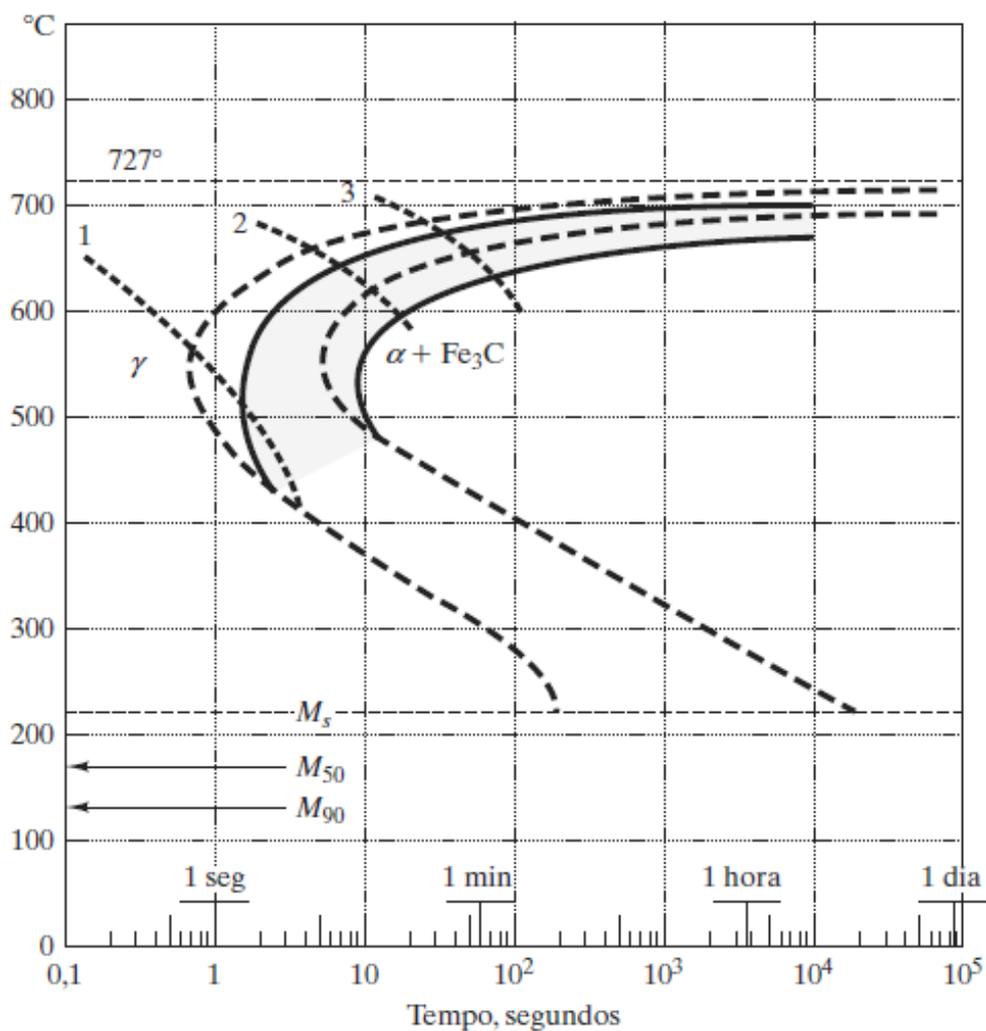


Figura 4 - Diagrama de transformação - tempo - temperatura TTT [12].

De acordo com (Shackelford [12]), as curvas 1, 2 e 3 presentes no diagrama da Figura 4 equivalem a: 1 - taxa de resfriamento rápida, 2 – taxa de resfriamento moderada e 3 – taxa de resfriamento lenta.

O diagrama TTT (Transformação - tempo - temperatura) recebe pontos de dois diagramas, diagrama ITT (Isothermal Time Transformation) e CCT (Continuous Cooling Transformation), transformação isotérmica e transformação por resfriamento contínuo, respectivamente, suprimindo a necessidade de descobrir o tempo e a temperatura de transformação. O gráfico ITT apenas apresenta precisão em suas transformações quando a temperatura do aço é mantida constante ao longo de todo o processo de tratamento térmico, o que seria uma desvantagem, pois os resfriamentos adotados nos tratamentos térmicos isotérmicos devem ser rápidos para que ocorram as transformações de fase. No caso do gráfico CCT, apresenta um resfriamento contínuo, ou seja, a microestrutura dependerá do meio de resfriamento utilizado [7].

Callister [7] afirma que, no resfriamento contínuo, o término das transformações sofre retardação e as curvas isotérmicas são deslocadas para tempos mais longos e temperaturas mais baixas.

## 1.5 Tratamento térmico

O tratamento térmico tem grande importância industrialmente e no cotidiano das pessoas pela utilização dos metais. E com a evolução dos seres humanos e da ciência, começou a preocupação em controlar temperaturas, meios de resfriamento e tempo de aquecimento do aço para adquirir as propriedades exatas, segundo a necessidade. O desenvolvimento tecnológico fez com que o tratamento térmico fosse feito com grande êxito, tendo aplicação nas indústrias automobilística, aeronáutica, peças, utensílios domésticos, ferramentas de diversas utilidades, tornando-se indispensável para obtenção de excelentes propriedades de todos os tipos de metais, transformando-os e melhorando-os [5]. Para isso, englobam uma ampla faixa de temperatura de aquecimento e resfriamento.

O tratamento térmico altera as propriedades mecânicas dos metais como dureza, tenacidade, ductilidade e resistência mecânica. Os tratamentos térmicos frequentemente utilizados são a normalização, o recozimento, a têmpera e o revenimento [10].

Este estudo busca o tratamento térmico como meio de aprimoramento do aço SAE 1045 para obter melhora nas suas propriedades mecânicas pela alteração de sua microestrutura e tornar mais abrangente sua utilização.

Fatores importantes como temperatura de aquecimento, velocidade de resfriamento, tempo de encharque, tempo de austenitização e a composição química do material precisam ser verificados e estudados antes da realização do processo, sendo necessário conhecer as características e, principalmente, a estrutura cristalina do material. Quando se deseja aumentar a resistência mecânica do aço de forma controlada para sua melhor aplicação, utiliza-se a têmpera [8].

### **1.5.1 Reozimento**

O reozimento é um tratamento térmico muito parecido com o revenimento, em que é reduzida a dureza de uma microestrutura mecanicamente deformada. No reozimento, a peça pode ser aquecida entre 500 °C e 900 °C e o resfriamento deve ser feito lentamente. De acordo com a porcentagem de carbono do aço, quanto maior a quantidade de carbono, mais lento será o resfriamento, muitas vezes podendo ser feito até no próprio forno desligado. Esse processo elimina a dureza de uma peça temperada, traz a dureza normal do aço, excluindo outros tratamentos térmicos, e dependendo da forma como for feita, também torna o aço mais homogêneo e melhora sua ductilidade, facilitando o processo de usinagem [12].

### **1.5.2 Normalização**

A normalização é um tratamento térmico que busca o refino de grão, é similar ao reozimento, mas o resfriamento é mais rápido, visando, principalmente, à microestrutura do material, não às propriedades mecânicas, transforma a microestrutura grosseira de peças fundidas, por exemplo, em microestruturas finas, e isso faz com que os carbonetos sejam menores, desta forma, sua dissolução em um tratamento térmico será maior. Por isso, em muitos casos, a normalização é feita antes dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido [3].

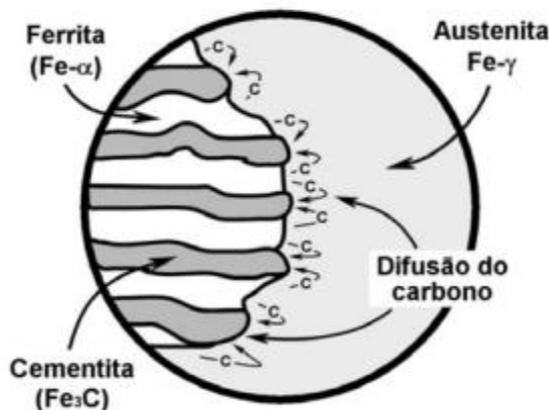
Segundo (Pavanati [3]), o processo de refino de grãos e, conseqüentemente, da microestrutura do aço traz maior resistência mecânica e dureza em comparação ao reozimento. Esses grãos são constituídos de perlita fina e ferrita, ou seja, placas de ferrita e cementita, que também melhoram a tenacidade do aço. A normalização consiste

no aquecimento do aço um pouco acima da zona crítica, onde ocorre a austenitização do aço e a dissolução dos carbonetos, passando o aço, logo após, por um resfriamento moderado.

### 1.5.3 Têmpera

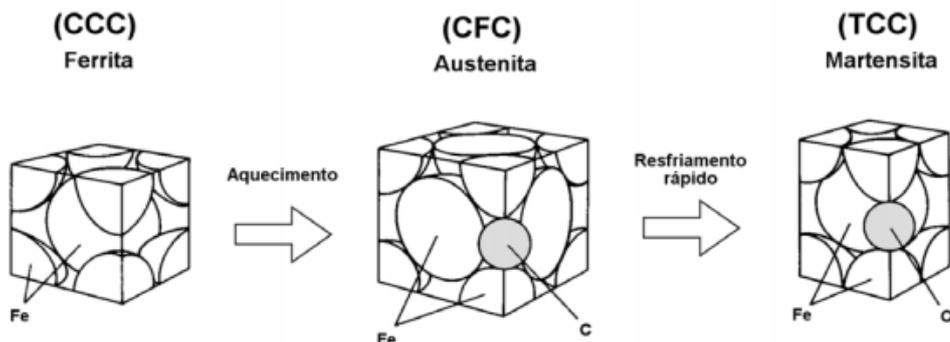
Na têmpera, o aço é aquecido em alta temperatura, ou seja, acima da zona crítica ou temperatura de austenitização, depois resfriado rapidamente em óleo, água ou salmoura (dependendo da temperabilidade do aço), com o objetivo principal de obter a estrutura martensítica, estrutura muito resistente à tração, tendo máxima dureza. É uma fase microestrutural muito importante, apresenta estrutura metaestável, sendo formada por uma supersaturação de carbono na estrutura do ferro, provocando distorções na rede cristalina. A transformação austenita-martensita ocorre pelo rápido resfriamento, não tendo o carbono tempo para se difundir, ficando preso, resultando em uma distorção da rede cristalina, impossibilitando que a estrutura se transforme em cúbica de corpo centrado (CCC), tornando-se então uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), que é a distorção da estrutura CCC do ferro, sendo responsável pela alta resistência mecânica, associada à dureza e à resistência ao desgaste [5].

Na têmpera, quando o aço é aquecido em alta temperatura, sua estrutura passa a ser austenita (CFC), com grande quantidade de carbono dissolvido. Se este aço for resfriado lentamente, a fase austenítica se transformará na fase ferrítica (CCC). Como a fase ferrítica não suporta a quantidade de carbonos da fase austenítica, os carbonos serão expulsos, então os microconstituintes se tornarão em cementita, que, em ligação com a ferrita, se torna em perlita, não em martensita, Figura 5, que é pretendida na têmpera [3].



**Figura 5- Formação da perlita (ferrita + cementita) a partir do resfriamento lento.**

Todavia, com o resfriamento rápido, o carbono não consegue sair da estrutura cristalina, então ocorre uma distorção da estrutura CCC, pois existe carbono nos interstícios. Pela distorção que a estrutura cristalina sofre em decorrência do rápido resfriamento do aço, é gerada uma nova estrutura, Figura 6, conhecida como tetragonal de corpo centrado (TCC), que tem uma rede cristalina bastante tensionada e distorcida, o que traz aumento da dureza e da resistência mecânica. Por outro lado, a tenacidade e a ductilidade caem bastante, por isso a importância do revenimento após a têmpera [3].



**Figura 6 - Esquema da estrutura cristalina do ferro durante a transformação CFC para CCC para a obtenção de estrutura TCC correspondente à martensita [3].**

A martensita é uma fase extremamente dura e frágil, apresentando ductilidade desprezível, porém, dependendo da utilização do aço, as tensões e a alta dureza provenientes da têmpera devem ser corrigidas, para isso o aço normalmente é submetido ao revenimento [8].

### 1.5.4 Revenimento

Quando se busca um tratamento térmico para aumento de resistência mecânica e da dureza, utiliza-se a têmpera, com intuito de obter martensita, que é o microconstituente mais duro obtido, porém muito frágil, e apresenta elevados níveis de tensões, consequência das transformações cristalinas. Para aliviar essas tensões e para agregar outras propriedades importantes ao aço como ductilidades e tenacidade, é feito o revenimento. No revenimento, o aço é reaquecido em temperaturas subcríticas, ou seja, temperaturas menores que  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  abaixo da linha A1 presente no diagrama de fases Fe-C, e o resfriamento do material aquecido deve ser feito em temperatura ambiente [13].

Segundo (Shackelford [12]), o reaquecimento nesse processo deve ser por tempos maiores no forno, e o resultado será um aço com maior ductilidade. A Figura 7 mostra o que ocorre no revenimento através do diagrama TTT.

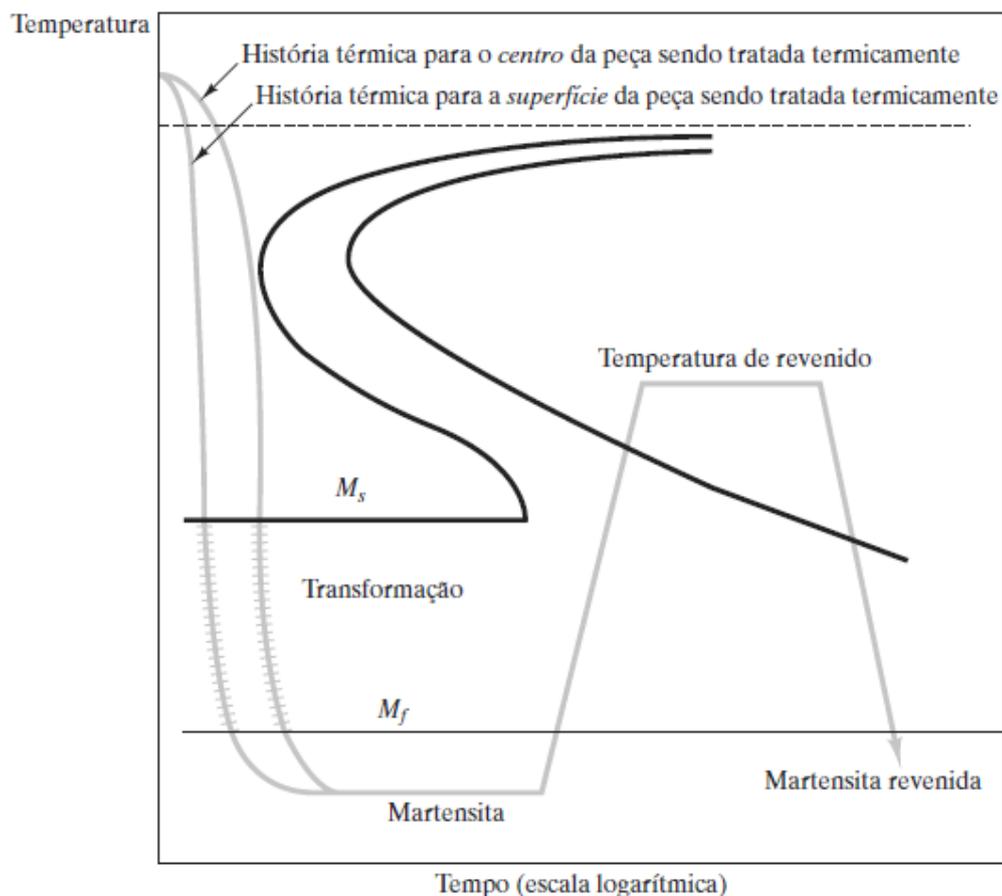


Figura 7 – Demonstração do revenimento no diagrama TTT [12].

O processo de revenido é como se fosse uma história térmica, em que a martensita é formada através da têmpera com um resfriamento brusco em água ou salmoura, tornando o material muito duro, porém muito frágil, impossível de ser utilizado, surgindo, neste momento, o revenimento. O aço é reaquecido, passa por um resfriamento lento, menos severo. A martensita revenida torna-se uma fase de equilíbrio de Fe-C e Fe<sub>3</sub>C [12].

## **1.6 Propriedades Mecânicas dos aços**

O aço é o metal mais utilizado no mundo, nas mais diversas aplicações, no entanto, ele nada seria sem as propriedades mecânicas apresentadas. São elas as responsáveis pelos diversos comportamentos que o aço pode adquirir.

Necessita-se de dureza e resistência mecânica para aplicações severas, mas para a usinagem, o material precisa apresentar ductilidade para ser trabalhado. A microestrutura, aliada a tratamentos térmicos, termoquímicos e à composição química do aço, é responsável pelas propriedades mecânicas para as diversas aplicações, mas para isso, é importante conhecer a caracterização das propriedades. A resistência mecânica nada mais é que a resistência a esforços mecânicos sem sofrer deformação ou ruptura. Para a determinação das propriedades mecânicas, são feitos ensaios mecânicos como os de tração, compressão, cisalhamento, torção, flexão e, por meio deles, obtém-se a resistência que tem o material.

Tão relevante quanto a resistência mecânica é a dureza para trabalhos mecânicos e de alto desgaste. A dureza é definida pelo grau de penetração do diamante no aço, normalmente, usado na ponteira do durômetro, equipamento utilizado para medir a dureza do material.

A elasticidade é a capacidade do material de se deformar elasticamente, já a ductilidade é a prática de se deformar plástica e permanentemente antes de se romper. Um material tenaz absorve energia devido à deformação até sua ruptura [14].

## **1.7 Ensaio de Dureza**

Para a definição de dureza de um material, atualmente existem vários ensaios mecânicos, sendo os ensaios por penetração a forma mais aplicada em aços. Quando o aço apresenta maior ductilidade, o material penetrante, (que normalmente é o diamante,

em razão da sua alta dureza) penetra mais, quando o material é mais duro, penetra menos. Assim sendo, a definição de dureza é o grau de penetração produzido em um ensaio mecânico de dureza em que a penetração diminui com o aumento da dureza [12].

### **1.7.1 Dureza Rockell**

O ensaio de dureza é demonstrado pela resistência à penetração de um material bastante duro em outro, para isso existem muitos equipamentos e métodos para essa medição. O equipamento penetra o aço e assim é feita a medição da dureza no próprio equipamento, através de um mostrador adequado que tem duas escalas (em preto externa e em vermelho interna) que mostrarão o valor de dureza em Rockwell. Normalmente, na ponta da ferramenta que entra em contato com o aço, utiliza-se diamante por ser um material duro. Cada equipamento apresenta medidas e formas diferentes. Neste estudo, será utilizado o durômetro Rockwell na escala C. Este ensaio, pela sua rapidez, facilidade e eficiência, é o mais utilizado no mundo inteiro [3].

## **1.8 Ensaio de tração**

Por meio do ensaio de tração, é possível obter várias informações sobre um material, não somente os valores de resistência à tração, mas também tensão de escoamento, limite de resistência, tensão máxima suportada, rigidez, elasticidade, módulo de elasticidade, plasticidade e tenacidade. O ensaio de tração submete uma peça a um esforço de tração até a ruptura. O corpo de prova é preso em duas extremidades e recebe uma força tracionando-o, começa a se deformar elástica e plasticamente até a ruptura. O equipamento retira informações importantes desse ensaio em razão do comportamento do material. Na deformação elástica, o material pode ainda se recuperar quando volta a seu tamanho normal, já na deformação plástica, o corpo de prova não regressa ao tamanho original [3].

Todos os corpos de prova utilizados no tratamento térmico de têmpera e revenimento serão submetidos ao ensaio de tração. Neste teste, será utilizado o equipamento modelo INSTRON EMIC 23-300 para verificar as propriedades mecânicas em cada etapa de teste e se os parâmetros testados influenciaram ou não nas propriedades do aço analisado.

## **1.9 Microscopia**

A microscopia tem grande relevância em qualquer trabalho acadêmico, principalmente em trabalhos experimentais, que buscam na microscopia os resultados de um longo processo experimental para a conclusão de etapas importantes. Além de trabalhos acadêmicos, as pesquisas, de um modo geral, vêm sendo beneficiadas com essa tecnologia. A microscopia contribui para o desenvolvimento do mundo em quase todas as áreas de pesquisa, pois é por meio das pesquisas que atualmente ocorrem tantas descobertas de medicamentos, novos materiais, utilização de nanotecnologias, aperfeiçoamento de materiais já existentes, entre outros benefícios.

Para o desenvolvimento desta pesquisa e melhoramento dos resultados, foram utilizadas as microscopias ótica e eletrônica de varredura.

### **1.9.1 Microscopia ótica**

A técnica microscópica mais utilizada em metais é a metalografia, em que um feixe de luz que se reflete sobre a amostra permite observar os cristais ou grãos presentes no aço, não sendo possível a olho nu, sendo o aumento máximo obtido nesse tipo de microscópio de 1400X [15].

Para a microscopia ótica, as amostras precisam ser preparadas para bons resultados, o tamanho e o peso devem ser limitados em razão do tamanho do porta-amostras do microscópio. Além disso, as mostras de aço, por exemplo, necessitam de lixamento e polimento adequado e, para revelar a microestrutura do material, é necessário um ataque químico. Nos aços, o ataque químico tem um tempo médio de 5 a 15 segundos para agir, logo após necessita ser limpo com álcool e seco com algodão e ar quente [6].

O ataque químico é essencial para a visualização da microestrutura do aço. É uma técnica corrosiva, ocorrendo por seu meio uma reflexão da luz, formando a imagem [15].

### **1.9.2 Microscopia eletrônica de varredura**

Diferentemente do microscópio ótico, que utiliza fótons, o microscópio eletrônico de varredura (MEV) opera com um feixe de elétrons que permite uma alta resolução e imagens muito mais detalhadas que o microscópio comum. O microscópio ótico continua sendo muito utilizado, principalmente por apresentar um preço menor,

quando comparado ao MEV, mas uma limitação desse microscópio é o aumento máximo que ele alcança, cerca de 2000 vezes, sendo que o MEV tem um aumento de até 900 000 vezes dependendo do material analisado, sendo capaz de alcançar resolução de até 1 nanômetro, transmitindo informações morfológicas de estruturas e identificando elementos químicos [16].

Ainda de acordo com (Dedavid [16]), o microscópio eletrônico de varredura tem no seu feixe elétrons retroespalhados que mostram a variação de composição e orientação cristalina e elétrons secundários, que exibem imagens topográficas.

## **1.10 Sustentabilidade**

O aço é um material inteiramente reaproveitado, sua sucata, depois de inutilizada, volta ao processo de fabricação, sendo derretida e voltando ao mercado como um novo produto, diminuindo a quantidade de resíduos gerados. O tratamento térmico auxilia bastante, pois age na melhora de materiais mecânicos e no reaproveitamento de muitos metais que sofrem manutenção, pois muitas vezes, perdem suas propriedades mecânicas. Diante disso, esta pesquisa busca analisar e estudar o aço 1045 e o possível melhoramento deste aço por meio de tratamentos térmicos com controle de parâmetros.

## **1.11 Análise de variância**

A análise de variância (ANOVA) analisa a variação total de um grupo de dados dentro dos grupos e entre os grupos, sendo que, na primeira análise, avalia a diferença de todos os valores em relação às médias dos grupos a que pertencem. Já na segunda análise, avalia a diferença existente entre as médias dos vários grupos existentes [17].

Segundo (Galdamez [18]), a ANOVA é um método que facilita o estudo das diferenças significativas se elas existirem a partir dos resultados experimentais.

Para a análise de variância, são necessários três grupos ou mais. Devem-se definir as hipóteses a serem testadas, sendo elas  $H_0$  ou  $H_1$ , considerando um nível de significância variando, geralmente, de 1% a 10%. A hipótese nula  $H_0$ , é que não exista diferença significativa em relação ao que está sendo analisado. A hipótese  $H_1$  é justamente o contrário da hipótese nula, ou seja, que existe pelo menos uma diferença significativa sendo testada [18]

Para elaboração da análise de variância, constrói-se uma tabela e, a partir da fonte de variação, utilizam-se as fórmulas calculando os seguintes itens: soma de quadrados (SQ), grau de liberdade (GL), média quadrática (MQ) e os fatores calculado e tabelado ( $F_{0cal}$ ,  $F_{0tab}$ ), nível de significância ( $p$ ), sendo que os valores de  $F_{0tab}$  são tabelados, havendo uma comparação com o  $F_{0cal}$  [19]. A Tabela 2 mostra uma ANOVA para dois fatores.

**Tabela 2** - Análise de variância para dois fatores [19].

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Média Quadrática Esperada	F <sub>0</sub>
Linhas (A)	$SQ_A$	$a - 1$	$MQ_A$	$\sigma^2 + n\sigma_{\tau\beta}^2 + \frac{bn\sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1}$	$\frac{MQ_A}{MQ_{AB}}$
Colunas (B)	$SQ_B$	$b - 1$	$MQ_B$	$\sigma^2 + an\sigma_{\beta}^2$	$\frac{MQ_B}{MQ_E}$
Interação	$SQ_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MQ_{AB}$	$\sigma^2 + n\sigma_{\tau\beta}^2$	$\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
Erro	$SQ_E$	$ab(n - 1)$	$MQ_E$	$\sigma^2$	
Total	$SQ_T$	$abn - 1$			

Para  $SQ_A$ ,  $SQ_B$ ,  $SQ_{AB}$ ,  $SQ_E$  e  $SQ_T$ , as fórmulas são as seguintes [19]:

$$SQ_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SQ_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} - SQ_A - SQ_B$$

$$SQ_E = SQ_T - SQ_A - SQ_B - SQ_{interação}$$

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

## 1.12 Justificativa

O estudo do aço SAE 1045 tem grande relevância científica e econômica pela sua vasta utilização na indústria e no cotidiano em ferramentas e utensílios, além de grande custo-benefício [13]. Os tratamentos térmicos modificam a microestrutura do aço, aperfeiçoando suas propriedades [13].

Portanto, para desenvolvimento do material estudado, a avaliação da influência da variação dos parâmetros relacionados ao tratamento térmico de têmpera e revenimento em aços torna-se relevante para auxiliar o entendimento e a aplicação dos tratamentos térmicos em metais de uma forma geral, além de contribuir com as pesquisas que vêm sendo desenvolvidas. Por conseguinte, este trabalho pretende servir como um instrumento de pesquisa e colaboração para o desenvolvimento de futuros trabalhos a serem desenvolvidos [5].

## 1.13 Material e Programa Experimental

### 1.13.1 Material

O material principal deste estudo é o aço SAE 1045 (barra trefilada com diâmetro de 8 mm), utilizado para os tratamentos térmicos de têmpera e revenido. A barra de aço adquirida na forma de barra circular no tamanho de 6 m foi cortada em pedaços de 250 mm, comprimento este determinado de acordo com a norma NBR ISO 6892 [20].

A Tabela 3 apresenta a composição química do aço utilizado, em destaque o carbono, pois, por meio dele, o aço apresenta variações e origina os vários microconstituintes do aço, após tratamento térmico.

**Tabela 3.** Composição química em porcentagem em peso de aço 1045 [21], [22].

C	Mn	P máx	S máx	Si
0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	0,10-0,60

A norma NBR 172/2000 classifica o aço SAE 1045 como um aço para construção mecânica [22].

O carbono é o elemento químico determinante desta liga, responsável pela resistência mecânica e dureza do aço. E ainda a temperabilidade do aço está ligada diretamente com o teor de carbono presente na liga [5], [9].

Adição de manganês (Mn) aumenta a resistência mecânica, porém o fósforo (P) e o enxofre (S) são impurezas prejudiciais à qualidade do aço, os demais elementos presentes são considerados impurezas do aço [21].

Para o corte das amostras, foram necessários um policorte e um esmeril para retirada das rebarbas proveniente do corte. Como meios de resfriamento do aço, foram utilizadas água a e salmoura (contendo 20% de sal na água), cerca de 5 litros de água, pois o aço SAE 1045 necessita perder calor muito rapidamente para a mudança desejada da sua microestrutura. A quantidade de água para resfriar a amostra após sair do forno em têmpera deve ser bem maior que o tamanho da amostra para que o resfriamento ocorra instantaneamente.

O equipamento utilizado para desenvolvimento deste trabalho foi inicialmente o forno para tratamento térmico de alta temperatura, onde foram aquecidas as amostras de aço. Para o ensaio de dureza, foi usado o durômetro modelo 200HR-150 na escala Rockwell C, utilizada por ser a mais utilizada, rápida e fácil de executar.

Para a determinação da microestrutura dos corpos de prova, foi utilizado para o corte das amostras um policorte refrigerado, para não permitir o aquecimento do aço e assim mudar sua microestrutura. Após o corte, foram utilizadas uma embutidora de amostras e baquelite granulada. Para o processo de lixamento e polimento, foram utilizadas lixas d'água com meshes de 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, politriz, pano para polimento e alumina de 1  $\mu\text{m}$  (*mícron*) diluída em água. Para revelar a microestrutura do aço, foi utilizado o reagente químico Nital 3%. Todos os itens citados são necessários para preparação das amostras para a fase de microscopia.

Na fase de microscopia, o aço passou pela análise da microscopia ótica. Por meio dela, foi possível analisar as fases e a microestrutura dos grãos antes e após os tratamentos térmicos [23]. Para a análise da microestrutura, foram necessários um microscópio metalográfico invertido marca Opton modelo TNM-07T-PL e uma câmera digital colorida 1.3 MP e software BEL capture V3.0 modelos TA-0124-A-Opton.

Para melhor visualização da microestrutura do aço, o material também teve a análise feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras passaram pela mesma preparação que na microscopia ótica.

Todos os materiais deste trabalho foram adquiridos com recursos próprios e os equipamentos foram disponibilizados pela Universidade de Rio Verde GO, departamento de Engenharia Mecânica.

### **1.13.2 Metodologia**

A pesquisa foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, foram feitos os tratamentos térmicos de têmpera de todas as amostras com tempos determinados, com base no diâmetro da barra de aço, que, neste caso, tem diâmetro de 8 mm, sendo este tempo determinado por uma regra de três simples. De acordo com a Gerdau [25], para cada 25mm de espessura, o aço deve permanecer no forno por 1 hora, adotando tempos menores, pois, neste caso, o aço tem diâmetro menor que 25 mm, e por se tratar de uma investigação experimental, buscaram-se maiores resultados de dureza [21]. Os tempos determinados desta forma foram de 9 minutos e 15 minutos [21], [24]. Para verificar a influência da temperatura de austenitização sobre as propriedades do aço, foram usadas três temperaturas diferentes. Por meio das literaturas [7], [12], [24], foram determinadas as temperaturas de 850°C, 875°C e 900°C, possivelmente as que proporcionariam melhores propriedades mecânicas ao aço.

Após a têmpera em todos os corpos de prova, foram feitos ensaios de dureza, tendo os valores médios de dureza sido utilizados para a elaboração dos testes estatísticos, cujos valores foram obtidos por meio de três pontos diferentes da amostra de aço.

Foi feito um planejamento estatístico fatorial, com posterior análise de variância para verificar os efeitos dos parâmetros dos tratamentos térmicos tempo, temperatura de austenitização e meio de resfriamento sobre as propriedades finais dos aços tratados termicamente: dureza, verificada por meio do ensaio de dureza, e a microestrutura, verificada por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, concluindo a primeira fase desta forma. Para esse planejamento, foram usados três níveis de temperatura de austenitização, dois níveis de tempo de austenitização, dois níveis de meios de resfriamento e duas réplicas para cada combinação de parâmetros.

A segunda etapa dos experimentos foi o tratamento térmico de revenimento, para isso, houve uma seleção das amostras por meio do ensaio de dureza dos aços temperados na primeira fase de experimentos. Nesta etapa, utilizou-se a combinação de parâmetros (tempo e temperatura de austenitização e meio de resfriamento), o que proporcionou maiores valores de dureza no aço temperado na primeira etapa. Para o revenimento, os aços foram submetidos à temperatura de 250°C, 325°C e 400°C por um tempo de 20 minutos e 30 minutos, com um resfriamento em temperatura ambiente em atmosfera normal, ao ar livre [13].

Após o revenimento, os aços passaram pelas mesmas análises da primeira fase, que foram os ensaios de dureza. E mesmo com a diminuição da dureza que já era esperada após o revenimento, logo, com os resultados de dureza da segunda fase, foram feitas as análises estatísticas, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

A microscopia ótica verificou a estrutura e grãos dos aços SAE 1045, antes e após os tratamentos térmicos para serem comparadas. Assim, a microscopia eletrônica de varredura revelando imagens com melhor qualidade e aproximação possibilitou a identificação da estrutura.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Verificar o efeito do tempo e da temperatura de austenitização e de revenimento e do método de resfriamento sobre a dureza e a microestrutura do aço SAE (American Iron and Steel Institute) 1045.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Fazer ensaio de dureza, análise metalográfica e microscopia eletrônica de varredura e analisar todos os resultados obtidos, comparando-os com resultados de outros trabalhos já desenvolvidos.
- Realizar uma análise de variância para verificar a influência dos parâmetros testados sobre as propriedades mecânicas e a microestrutura final após os tratamentos térmicos e análises de microscopias.

## 2.3 Referências Bibliográficas

- [1] AÇOBRASIL. A indústria do aço no Brasil. Confederação Nacional do aço. Instituto aço Brasil. Brasília, Distrito Federal, p.64, 2017.
- [2] SCHEID, Adriano. Curso básico de aços. Universidade Federal do Paraná, p.100, 2010.
- [3] PAVANATI, Henrique C. Introdução à tecnologia dos materiais. Instituto Federal de Santa Catarina, p.171, 2010.
- [4] TSCHIPTSCHIN, André P. Mundo dos aços especiais. Processo de Fabricação. Gerdau, 2019.
- [5] FREITAS, Brenda, J. M. Estudo da influência das temperaturas de austenitização na dureza dos aços AISI d6 e SAE 1045. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p.89. 2016.
- [6] GALLO, Giulliano B. Influência do Tratamento Térmico sobre a Tenacidade de um Aço AISI SAE 1045 com Médio Teor de Carbono Avaliado por Ensaio de Impacto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, p. 115, 2006.
- [7] COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4. Ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- [8] CALLISTER, Jr. Willian D.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [9] CALLISTER, J. Willian. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- [10] CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento. 2ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [11] BRUNATTO. Silvio F. Introdução ao estudo dos aços. Universidade Federal do Paraná, p. 39-59, 2016.
- [12] SHACKELFORD, James F. Introdução à ciência dos materiais para engenheiros. 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [13] MARTINS, Marcelo. Temperabilidade Jominy e influência do revenido sobre a dureza - um estudo em aços estruturais nacionais. Universidade Federal de Santa Catarina, p.115, 2002.
- [14] OLIVEIRA, Bárbara, F. Efeito os tratamentos térmicos sobre a microestrutura e as propriedades de um aço ARBL microligado com estrutura bruta de solidificação. Universidade Estadual do Norte do Fluminense Darcy Ribeiro, p.177, 2014.
- [15] MACEDO, Miguel, C. et al. Caracterização de amostras por microscopia óptica e por microdureza de materiais metálicos ferrosos e não ferrosos. Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS - Campus Porto Alegre, v.2, n.3, p. 48-61, 2015.
- [16] DEDAVID, Berenice, A. et al. Microscopia Eletrônica de Varredura, aplicações e preparação de amostras. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, p.60, editora EDIPUCRS, 2007
- [17] SANTO, Helena, E. Calcular e apresentar tamanhos do efeito em trabalhos científicos (3): Guia para reportar os tamanhos do efeito para análises de regressão e ANOVAs. Revista Portuguesa de Investigação Comportamental e Social, v.4, p. 34-60, 2018.

- [18] GALDAMEZ, Edwin.V.C; Ribeiro Carpinetti, Luiz C. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. Revista Gestão e Produção.2004.
- [19] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBRLE, N. F. Estatística Aplicada à Probabilidade para Engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR ISSO 6892. Materiais metálicos - Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. 2013 incorpora a Errata 2 de 17.09.2018.
- [21] STEIN, Cristiano R.; HERMENEGILDO, Tahiana F.; ARAÚJO, Fernando G. S.; COTA, André B. Efeito da Rápida Austenitização sobre as Propriedades Mecânicas de um Aço SAE 1045. Revista Escola de Minas. Ouro Preto, v.58, n.1, jan.-mar. 2005.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 172/2000. Critérios de classificação dos aços. Válida a partir de 30/11/2000.
- [23] CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. Editora: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM. São Paulo, 2005
- [24] ARAÚJO, M. D. Influência do Tratamento Térmico na Microestrutura do Aço Abnt/Sae 1045. Universidade de Rio Verde. Rio Verde, Goiás, p. 73. 2012.
- [25] GERDAU GDD1 SAE 1045. Catálogo. Disponível em< <https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-1045.pdf>>. Acesso: 10/08/2020.

### 3. CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a Revista IBRACON de Estruturas e Materiais - RIEM)

#### **Caracterização estrutural e microestrutural do aço SAE 1045 submetido a tratamento térmico**

Structural and microstructural characterization of 1045 steel SAE  
submitted to thermal treatment

W.R. Nunes <sup>a</sup>

wenislainy@hotmail.com

I.C. Reis <sup>a</sup>

idalci.reis@ifgoiano.edu.br

Bacus de Oliveira Nahime

B.O. Nahime

bacusnahime@ifgoiano.edu.br

W.A. Pereira <sup>b</sup>

warley@unirv.edu.br

#### ***Resumo***

Como objeto de investigação para o presente estudo, utilizou-se o aço SAE 1045, por ser um aço com médio teor de carbono, ter ampla utilização, porém possui propriedades mecânicas limitadas para aplicações severas. Este estudo se justifica pela necessidade de melhora de propriedades do material, ampliando o leque de aplicações. O objetivo desta pesquisa é compreender o efeito do tempo e da temperatura de austenitização e do método de resfriamento e suas implicações sobre a dureza do aço SAE 1045. Diante disso, a têmpera e o revenimento foram tratamentos térmicos utilizados. O tratamento térmico modifica a estrutura cristalina do aço, melhorando suas propriedades mecânicas e aliviando tensões. Para o desenvolvimento experimental, os meios de resfriamento usados para a têmpera foram água e salmoura, e as temperaturas determinadas 850°C, 875°C e 900°C, com o objetivo de obter estrutura martensítica e a máxima dureza do

aço. No revenimento o meio de resfriamento foi ao ar livre em temperatura ambiente, e as temperaturas de aquecimento determinadas foram 250°C, 325°C e 400°C, com a finalidade de diminuir a dureza excessiva da martensita e tornar o aço mais tenaz e dúctil. O ensaio de dureza confirmou a presença de martensita assim como a microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura nas amostras temperadas. Já nas amostras revenidas apareceram microconstituintes que melhoram a tenacidade e ductilidade como ferrita bainítica e austenita retida. A análise de variância não teve nível de significância de 5% na primeira fase de experimentos, mas na segunda fase obteve. Na investigação da microestrutura, aplicou-se a microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura que apontaram melhora na microestrutura no material.

**Palavras-chave:** Têmpera. Revenimento. Ensaio de dureza. Microscopia. Análise de variância.

### **Abstract**

As the object of investigation for the present study, SAE 1045 steel was used, as it is a steel with medium carbon content, having wide use, however it has limited mechanical properties for severe applications. This study is justified by the need to improve material properties, expanding the applications range. The aim of this research is to understand the effect of austenitizing time and temperature as well as the cooling method and its implications on the SAE 1045 steel hardness. In view of this, quenching and tempering were used as thermal treatments. For the experimental development, the cooling medium used for quenching were water and brine, and the temperatures determined were 850°C, 875°C and 900°C, with the objective of obtaining martensitic structure and the maximum steel hardness. In tempering, the cooling medium was outdoors at ambient temperature, and the heating temperatures determined were 250 ° C, 325 ° C and 400 ° C, in order to reduce the excessive hardness of the martensite and make the steel more tenacious and ductile. The hardness test confirmed the presence of martensite as well as optical microscopy and scanning electron microscopy in the tempered samples. In the tempered samples, microconstituents appeared, which improve toughness and ductility such as bainitic ferrite and retained austenite. The analysis of variance did not have a significance level of 5% in the first phase of experiments, but in the second phase it was observed. In the microstructure

investigation was applied optical microscopy and scanning electron microscopy, which showed improvement in the microstructure of the material.

**Keywords:** Quenching. Tempering. Hardness test. Microscopy. Analysis of variance.

### 3.1 Introdução

Aços têm aplicações nas diversas áreas, na mecânica em peças, ferramentas, maquinários, na construção civil, em estruturas de casas e prédios, na fabricação de tubos, na indústria naval, utensílios domésticos. Apresentam uma grande funcionalidade, no entanto, em muitos casos, os aços necessitam ser reforçados com elementos de liga que os tornam mais resistentes ou com tratamentos térmicos que mudam sua microestrutura, modificando suas propriedades mecânicas sem alterar sua composição química.

O processamento, tanto do minério quanto da sucata, é economicamente vantajoso, visto ter baixo custo em relação a outras ligas e apresentar uma variação imensa em suas propriedades mecânicas, tanto com adição de outros elementos quanto na utilização de tratamentos térmicos, sendo totalmente reaproveitados sem perda de qualidade [1].

Visualizando empregar o leque de aplicações custo-benefício, utilizou-se o aço SAE 1045, uma liga de médio teor de carbono que apresenta boa resistência mecânica, temperabilidade baixa, com pouca penetração de dureza na seção transversal [2]. Esta liga apresenta em sua composição desde a quantidade de 0,008%p até cerca de 2,14%p de carbono [3].

Por meio do tratamento térmico, pode-se ter a microestrutura modificada e melhorada segundo a necessidade de uso. Caso seja submetido a trabalhos mecânicos excessivos e de grande desgaste, deve-se aumentar a resistência mecânica, para isso, são aplicados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, que trarão a resistência mecânica necessária, corrigindo a dureza excessiva proveniente da têmpera [4]. Os microconstituintes presentes nos aços para este estudo são austenita ferrita, perlita, cementita, bainita e martensita. Os tratamentos térmicos empregados neste contexto foram a têmpera e o revenimento [5], [6].

Este estudo tem como objetivo o tratamento térmico como meio de aprimoramento do aço SAE 1045. Para a modificação da microestrutura do aço, assim

como das propriedades mecânicas, o tempo, a temperatura de austenitização e o meio de resfriamento do material são responsáveis pelo aperfeiçoamento do aço, tornando mais abrangente sua utilização [7]. De acordo com (Stein [8]), a austenita é um microconstituente do aço que sempre estará presente durante os tratamentos térmicos. Por meio da austenita, são definidas toda mudança microestrutural do aço e, conseqüentemente, a transição nas propriedades mecânicas.

Outro objetivo deste estudo é verificar o efeito do tempo e da temperatura de austenitização e de revenimento, do método de resfriamento sobre a dureza e a microestrutura do aço SAE (American Iron and Steel Institute) 1045.

### **3.1.1 Justificativa**

O estudo do aço SAE 1045 tem grande relevância científica e econômica pela sua vasta utilização na indústria e no cotidiano em ferramentas e utensílios, além grande custo-benefício [9]. Os tratamentos térmicos modificam a microestrutura do aço, aperfeiçoando suas propriedades [9].

Portanto, para desenvolvimento do material estudado, a avaliação da influência da variação dos parâmetros relacionados ao tratamento térmico de têmpera e revenimento em aços torna-se relevante para auxiliar o entendimento e a aplicação dos tratamentos térmicos em metais de uma forma geral, além de contribuir com as pesquisas que vêm sendo desenvolvidas. Por conseguinte, este trabalho pretende servir como instrumento de pesquisa e colaboração para o desenvolvimento [4].

## **3.2 Material e Programa Experimental**

### **3.2.1 Material**

O material deste estudo é o aço SAE 1045 (barra trefilada com diâmetro de 8 mm), utilizado para os tratamentos térmicos de têmpera e revenido. As barras de aço adquiridas na forma de barra circular no tamanho de 6 m foram cortadas em amostras (pedaços) de 250 mm, comprimento este determinado de acordo com a norma NBR ISO 6892 [10]. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço utilizado, em destaque o carbono, pois, por meio dele, o aço apresenta variações e origina os vários microconstituintes do aço, após o tratamento térmico.

**Tabela 1.** Composição química em porcentagem em peso de aço 1045 [8], [11].

C	Mn	P máx	S máx	Si
<b>0,43-0,50</b>	0,60-0,90	0,040	0,050	0,10-0,60

A norma NBR 172/2000 classifica o aço SAE 1045 como um aço para construção mecânica [11].

O carbono é o elemento químico determinante desta liga, responsável pela resistência mecânica e dureza do aço. A temperabilidade do aço está ligada diretamente ao teor de carbono presente na liga [4], [6].

A Tabela 1 mostra presença de manganês (Mn), que aumenta a resistência mecânica, porém o fósforo (P) e enxofre (S) são impurezas prejudiciais à qualidade do aço, os demais elementos presentes são considerados impurezas do aço [8].

Para a obtenção das amostras, foram necessários um policorte e um esmeril para retirada das rebarbas provenientes do corte. Como meios de resfriamento do aço, foram utilizadas água e salmoura (contendo 20% de sal na água), cerca de 5 litros de água, pois o aço SAE 1045 necessita perder calor muito rapidamente para a mudança desejada da sua microestrutura. A quantidade de água para resfriar a amostra após sair do forno em têmpera deve ser bem maior que o tamanho da amostra para que o resfriamento ocorra instantaneamente.

Entre os equipamentos utilizados para desenvolvimento deste trabalho, está inicialmente o forno para tratamento térmico de alta temperatura, onde foram aquecidas as amostras de aço. Já para o ensaio de dureza, foi usado o durômetro modelo 200HR-150 na escala Rockwell C, por ser a mais utilizada, rápida e fácil de executar.

Para a verificação da microestrutura dos corpos de prova, foi utilizado para o corte das amostras em um tamanho de 250 mm um policorte refrigerado, para não permitir o aquecimento do aço e assim mudar sua microestrutura. Após o corte, as amostras para a análise metalográfica foram embutidas em baquelite. Para o processo de lixamento e polimento, foram usadas lixas d'água com mesh de 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, politriz, pano para polimento e alumina de 1 µm (mícron) diluída em água. Para revelar a microestrutura do aço, foi usado o reagente químico Nital 3%. Todos os itens citados foram necessários para preparação das amostras para a análise microscópica.

Para melhor visualização da preparação das amostras para microscopia, a Figura 1 mostra um fluxograma com o passo a passo.



Figura 1 – Fluxograma da preparação das amostras de aço para microscopia.

Na microscopia, o aço passou pela análise da microscopia ótica, por meio da qual foi possível analisar as fases e a microestrutura dos grãos antes e após os tratamentos térmicos [14], [22]. Para a microscopia ótica, foram utilizados um microscópio metalográfico invertido marca Opton modelo TNM-07T-PL e uma câmera digital colorida 1.3 MP e software BEL capture V3.0 modelos TA-0124-A-Opton, buscando a análise da microestrutura.

Para melhor visualização da microestrutura do aço, também foi feita uma análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com um microscópio modelo JEOL JSM 7100F (FEG). As amostras passaram pela mesma preparação que na microscopia ótica apresentado na Figura 1.

### 3.2.2 Metodologia

A pesquisa foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, foram feitos os tratamentos térmicos de têmpera de todas as amostras com tempos determinados, com base no diâmetro da barra de aço que, neste caso, tem diâmetro de 8 mm, sendo este tempo determinado por uma regra de três simples. De acordo com a Gerdau [24], para cada 25mm de espessura, o aço deve permanecer no forno por 1 hora, adotando tempos menores, pois, neste caso, o aço tem diâmetro menor que 25 mm, e por se tratar de uma investigação experimental, buscam-se maiores resultados de dureza [8]. Os tempos determinados desta forma foram de 9 minutos e 15 minutos [8], [16]. Para verificar a influência da temperatura de austenitização sobre as propriedades do aço, foram usadas três temperaturas diferentes. Por meio das literaturas [13], [16], [17], foram determinadas as temperaturas de 850°C, 875°C e 900°C, possivelmente as proporcionariam melhores propriedades mecânicas ao aço.

Após a têmpera em todos os corpos de prova, foram feitos ensaios de dureza, tendo sido os valores médios de dureza utilizados para a elaboração dos testes estatísticos, cujos valores foram obtidos por três pontos diferentes da amostra de aço.

Foi feito um planejamento estatístico fatorial, com posterior análise de variância para verificar os efeitos dos parâmetros dos tratamentos térmicos tempo, temperatura de austenitização e meio de resfriamento sobre as propriedades finais dos aços tratados termicamente: dureza, verificada por meio do ensaio de dureza, e a microestrutura, verificada por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, concluindo, assim, a primeira fase. Para esse planejamento, foram usados três níveis de temperatura de austenitização, dois níveis de tempo de austenitização, dois níveis de meios de resfriamento e duas réplicas para cada combinação de parâmetros.

A segunda etapa dos experimentos foi o tratamento térmico de revenimento, para isso, houve uma seleção das amostras por meio do ensaio de dureza dos aços temperados na primeira fase de experimentos. Nesta etapa, utilizou-se a combinação de parâmetros (tempo e temperatura de austenitização e meio de resfriamento), o que proporcionou maiores valores de dureza no aço temperado na primeira etapa. Para o revenimento, os aços foram submetidos à temperatura de 250°C, 325°C e 400°C por um tempo de 20 minutos e 30 minutos, com um resfriamento em temperatura ambiente em atmosfera normal, ao ar livre [9].

Após o revenimento, os aços passaram pelas mesmas análises da primeira fase, os ensaios de dureza. E mesmo com a diminuição da dureza que já era esperada após o revenimento, logo, com os resultados de dureza da segunda fase, foram feitas as análises estatísticas, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

A microscopia ótica verificou a estrutura e os grãos dos aços SAE 1045 antes e após os tratamentos térmicos para serem comparados. Assim, a microscopia eletrônica de varredura revelando imagens com melhor qualidade e aproximação possibilitou a identificação da estrutura.

### **3.3 Resultados e Discussões**

#### **3.3.1 Ensaio de Dureza**

A Tabela 2 apresenta os resultados médios do ensaio de dureza na escala Rockwell C e todos os parâmetros que foram analisados, sendo eles, a temperatura de

austenitização, tempo e os meios de resfriamento sobre a dureza do aço SAE 1045, através do planejamento fatorial.

No planejamento fatorial, são feitos testes com todas as combinações possíveis, neste caso, com os valores das Tabelas 2 e 3, e com os resultados dessa interação verifica-se se algum dos parâmetros analisados apresentou influência sobre a dureza, sendo, portanto, possível definir as melhores condições experimentais [12].

**Tabela 2. Valores de dureza médios em função do meio de resfriamento, tempo e temperatura de austenitização utilizados no planejamento fatorial.**

Meios de Resfriamento	Tempo de Austenitização					
	9 minutos			15 minutos		
	Temperaturas de Austenitização (°C)					
	850	875	900	850	875	900
Água	62,33	62	58,83	61,83	60	57,33
	56,5	60,5	63,5	62,67	58,5	61,17
Salmoura	45,33	64,17	63,83	49,33	65,67	63,83
	57	62,5	63,33	63,83	61,83	60,67

Após têmpera foi feito o revenimento das amostras que apresentaram os maiores valores médios de dureza, que foram tratadas a 875°C em 15 minutos e resfriada em salmoura, obtendo o valor médio de dureza de 65,67. Logo em seguida ao revenimento, foi feito o ensaio de dureza dessas amostras, que variaram para dois tempos e três temperaturas.

A Tabela 3 apresenta os valores de dureza médios na escala Rockwell C após o tratamento de revenimento. O resfriamento das amostras ocorreu ao ar livre.

**Tabela 3. Valores de dureza médios para verificação da influência do tempo e da temperatura de revenimento sobre a dureza do aço SAE 1045 (valores de dureza em HRC).**

Tempos	Temperatura de revenimento (°C)		
	250	325	400
20 minutos	45	47,8	39

	48,2	44,8	40,7
<b>30 minutos</b>	48,3	42,5	42,3
	47,3	42,7	43,3

### 3.3.2 Análise de Variância

A Tabela 4 apresenta a análise de variância utilizada para verificar a influência do tempo e da temperatura de austenitização e do meio de resfriamento sobre a dureza do aço SAE 1045.

Verificou-se que nenhuma das variáveis analisadas apresentou influência com nível de significância de 5%. Com um nível de significância de 10%, a relação entre meio de resfriamento x temperatura mostrou influência.

**Tabela 4: Análise de variância da primeira etapa.**

<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>0cal</sub></b>	<b>F<sub>0tab</sub></b>	<b>p-valor</b>
<b>Meio de Resfriamento</b>	0,614	1	0,6144	0,03	4,75	0,36075
<b>Tempo (min)</b>	1,949	1	1,9494	0,10	4,75	0,46508
<b>Temperatura (°C)</b>	102,591	2	51,2953	2,74	3,89	0,04949
<b>Meio de Resfriamento x Tempo</b>	5,189	1	5,1894	0,28	4,75	0,01869
<b>Meio de Resfriamento x Temperatura</b>	132,611	2	66,3055	3,54	3,89	0,19833
<b>Tempo x Temperatura</b>	38,603	2	19,3015	1,03	3,89	0,20053
<b>Meio de Resfriamento x Tempo x Temperatura</b>	1,226	2	0,6130	0,03	3,89	0,72961
<b>Erro</b>	224,979	12	18,7483			

Com os resultados da análise estatística, chegou-se aos gráficos de superfície de resposta apresentados. A Figura 2 mostra a relação entre os parâmetros analisados, meio de resfriamento, temperatura de austenitização e dureza.

De acordo com o gráfico da Figura 2 e os resultados da análise estatística, a dureza do aço tende a aumentar com o crescimento da temperatura de austenitização e com resfriamento em água, mas houve uma diferença significativa em comparação com a dureza do aço resfriado em salmoura, sendo possível observar no gráfico, que manteve a inclinação da curva praticamente constante, e os parâmetros testados não sofreram grandes alterações.

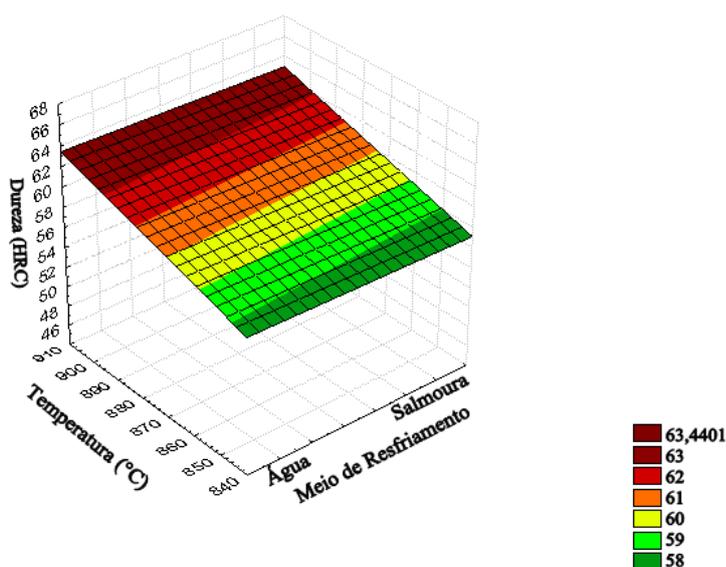


Figura 2. Superfície de resposta da relação meio de resfriamento x Temperatura de austenitização x dureza.

A Figura 3 refere-se à superfície de resposta da relação entre o tempo de austenitização, o meio de resfriamento e a dureza.

O gráfico da Figura 3 mostra que, para um tempo de austenitização de 9 minutos, a têmpera em água promoveu durezas ligeiramente maiores no aço que em salmoura. Para o tempo de austenitização de 15 minutos, não se observou diferença significativa de 5% no valor da dureza para qualquer meio de resfriamento.

O resfriamento em salmoura trouxe maior dureza ao aço após a têmpera, Tabela 2, tendo o maior valor médio de 65,67, enquanto o maior valor médio de dureza do aço resfriado em água foi de 63,5. Embora tenham sido observadas variações nos valores das durezas medidas com a variação dos parâmetros estudados, a análise de variância mostrou que essas variações não são estatisticamente significantes.

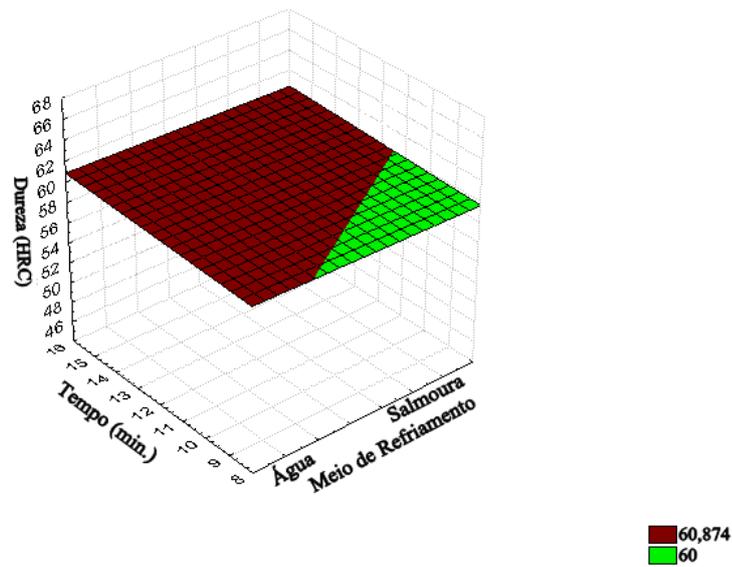


Figura 3. Superfície de resposta da relação Tempo de austenitização x meio de resfriamento x dureza.

A Figura 4 mostra a superfície de resposta da relação entre o tempo de austenitização, a temperatura de austenitização e a dureza.

Analisando o gráfico da Figura 4, observou-se tendência de aumento da dureza com a elevação da temperatura de austenitização. Com relação à influência do tempo de austenitização sobre a dureza, observou-se que praticamente não há alteração da dureza com a variação do tempo de austenitização.

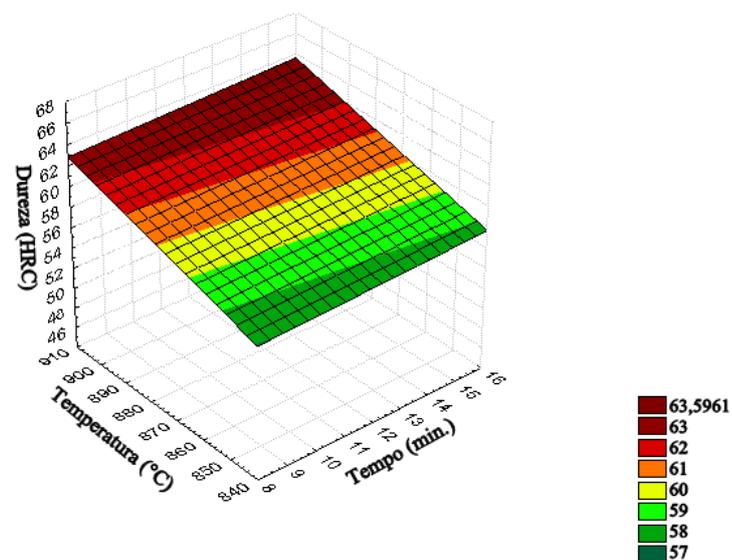


Figura 4. Superfície de resposta da relação tempo de austenitização x temperatura de austenitização x dureza.

A Tabela 5 apresenta a análise de variância após tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, para verificar se, em um nível de significância de 5%, o tempo e a temperatura de revenimento afetam a dureza do aço SAE 1045.

**Tabela 5: Análise de variância da segunda etapa.**

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F <sub>crítico</sub>	Valor-p	Influência
Tempo (min)	0,0675	1	0,0675	0,0335	5,9874	0,8608	NÃO
Temperatura (°C)	69,125	2	34,5625	17,1597	5,1433	0,0033	SIM
Interação tempo x temperatura	23,765	2	11,8825	5,8995	5,1433	0,0383	SIM
Erro	12,085	6	2,0142				
Total	105,0425	11					

O revenimento tende a diminuir a dureza do aço, assim como as tensões provenientes da têmpera. A análise de variância mostrou que, a um nível de significância de 5%, apenas a temperatura afetou a dureza e também houve interação entre o tempo e a temperatura de revenimento.

A Figura 5 mostra o comportamento da dureza em função do tempo e da temperatura de revenimento. Pode-se observar que a dureza diminui com a elevação da temperatura, mas que praticamente não se altera com a variação do tempo, conforme verificado na análise de variância. Observou-se também que, após o revenimento das amostras, a maior dureza foi obtida com a menor temperatura (250°C) e que permaneceu mais tempo no forno (30 min).

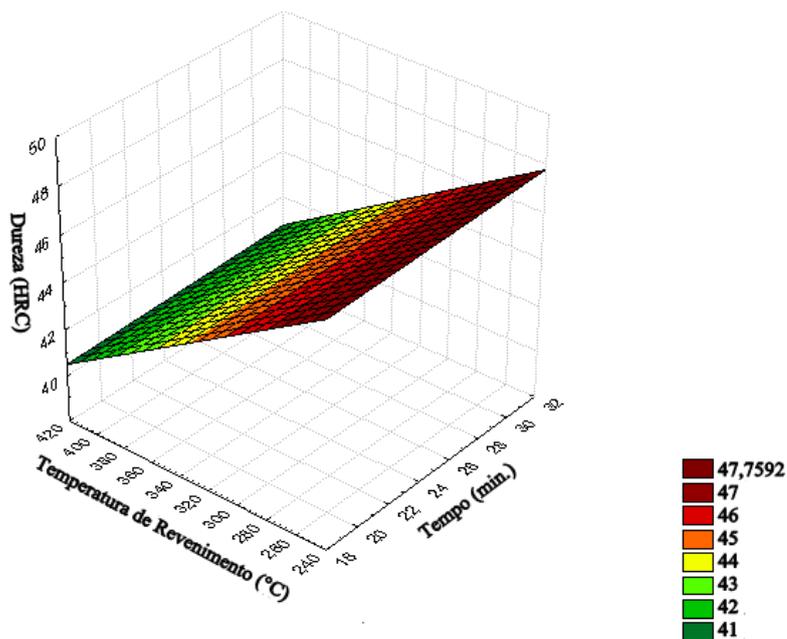


Figura 5. Superfície de resposta da relação dureza, temperatura de revenimento e tempo.

### 3.4 Microscopia Ótica

A fase de microscopia ótica foi feita em três amostras do aço SAE 1045, sendo uma amostra sem tratamento térmico (amostra de controle), uma amostra que apresentou a maior dureza com resfriamento em água e uma amostra que obteve a maior dureza com resfriamento em salmoura, observando assim a mudança microestrutural do aço. A Figura 6 apresenta a micrografia da amostra de controle.

A foto “a” da Figura 6 mostra a região mais próxima da superfície, onde é possível ver a parte escura que é a baquelite usada no embutimento da amostra. A foto “b” da Figura 6 mostra uma parte mais centralizada da amostra. Os pontos escuros nas micrografias de controle podem indicar oxidação ou porosidades, e a microestrutura apresenta ferrita (região clara) e perlita (região escura) [13].

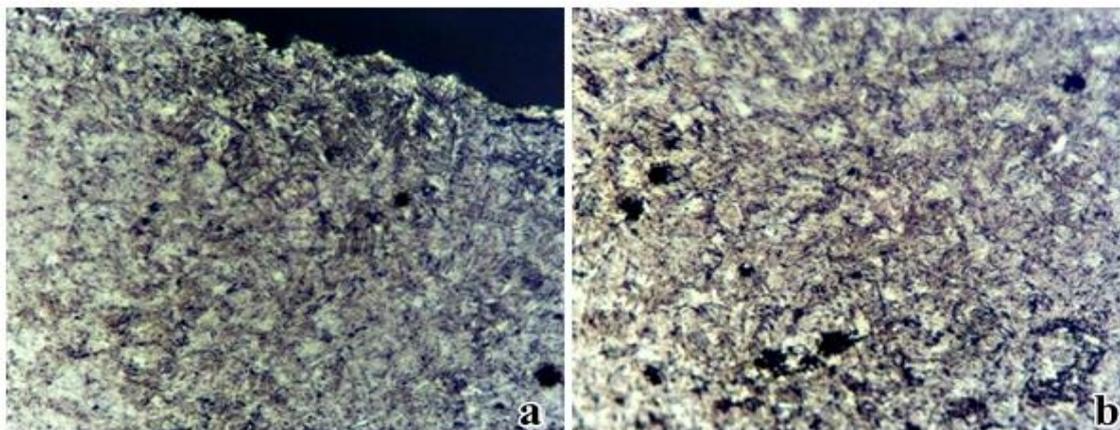


Figura 6. Micrografias de aço SAE 1045 sem tratamento térmico (amostra de controle), ataque com Nital 3%, ampliação de 400x.

A Figura 7 apresenta a micrografia da amostra temperada a 900°C por 9 minutos, resfriada em água.

As fotos da Figura 7 apresentam a micrografia da amostra temperada e resfriada em água, mostrando a região mais centralizada da peça. Foram verificadas uma estrutura martensítica com formação de agulhas e uma parcela de ferrita acicular [17].

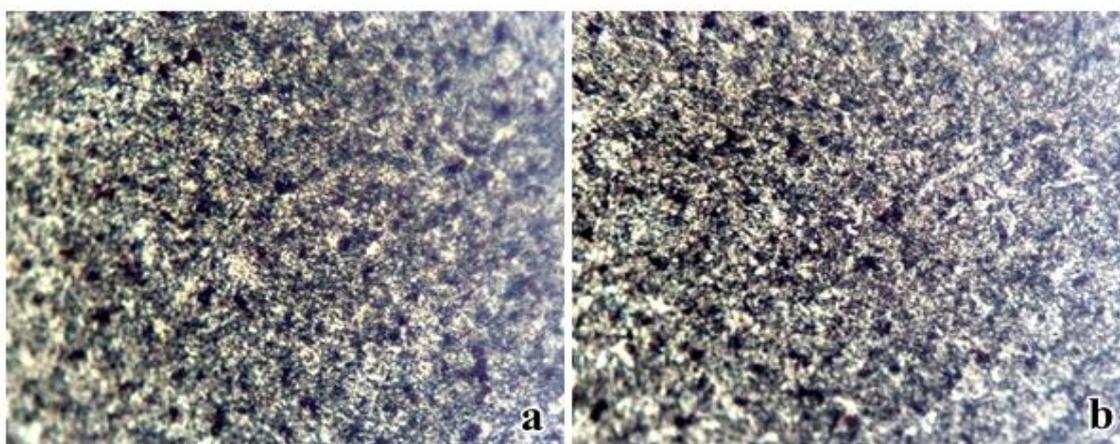


Figura 7. Micrografias de aço SAE 1045, temperado e resfriado em água a 900°C por 9 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 400x.

A Figura 8 apresenta a micrografia da amostra temperado a 875°C por 15 minutos e resfriado em salmoura.

A Figura 8 apresenta as micrografias das amostras temperadas e resfriadas em salmoura. As imagens são da região mais centralizada da peça, confirmando presença de martensita proveniente da têmpera com resfriamento brusco. A diferença entre as

duas estruturas é que na têmpera em salmoura a martensita apresentou agulhas mais finas do que na têmpera em água, o que tornou o aço um pouco mais duro, confirmando o resultado dos ensaios de dureza.

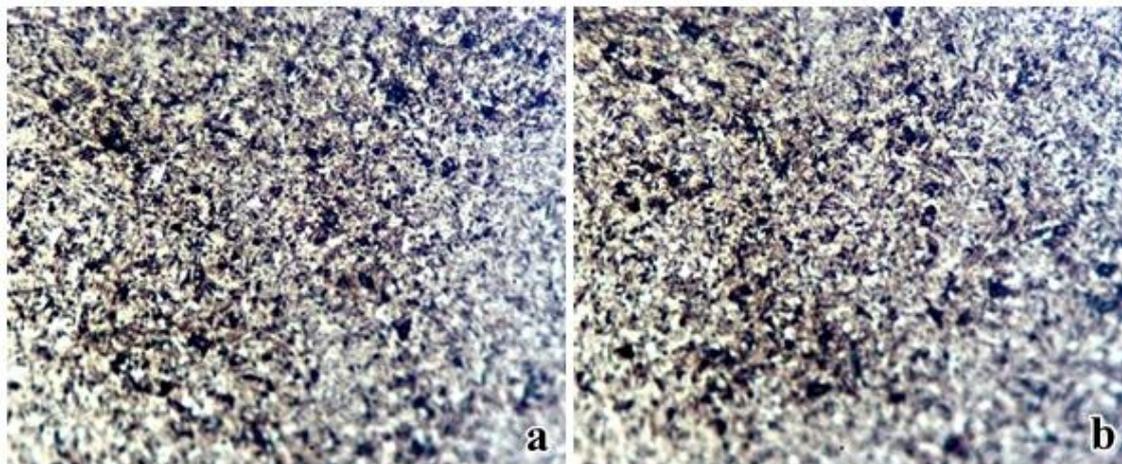


Figura 8. Micrografias de aço SAE 1045, temperado e resfriado em salmoura, a 875°C por 15 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 400x.

### 3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 9 apresenta as análises com o microscópio eletrônico de varredura (MEV). A microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresenta maior resolução que a microscopia ótica, permitindo maior visualização de cada microconstituente presente em cada tratamento térmico. As imagens são referentes à amostra de controle.

As amostras de controle apresentaram grãos mais claros, que são lamelas de perlita, sendo os escuros acinzentados e lisos, lamelas de ferrita [13].

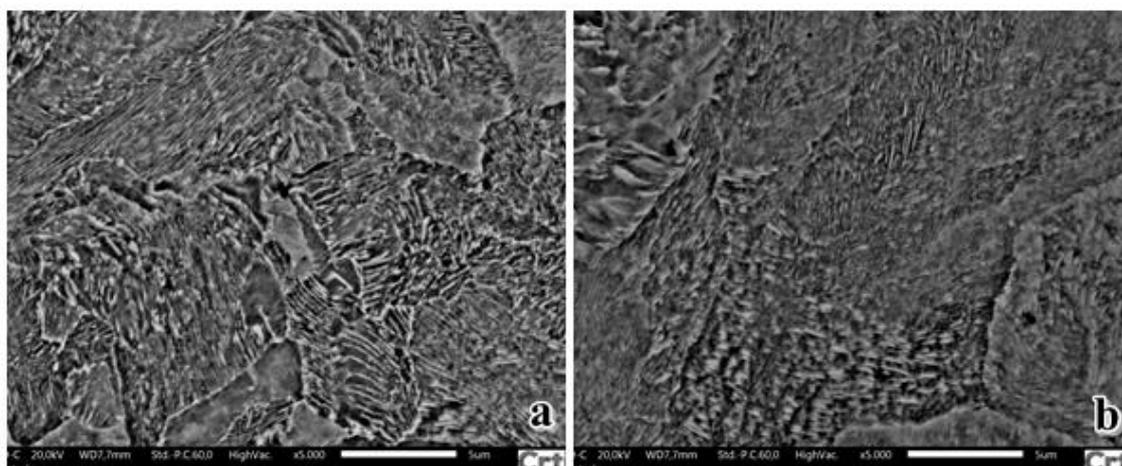


Figura 9. Micrografias do MEV: amostra de controle sem tratamento térmico, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

Nas amostras a e b da Figura 10, os grãos presentes são glóbulos de cementita sobre um fundo de ferrita [14]. Além disso, foram verificadas lamelas finas de perlita e martensita-austenita [18], [13].

A Figura 10 exibe as imagens da amostra temperada a 900°C por 9 minutos e resfriada em água.

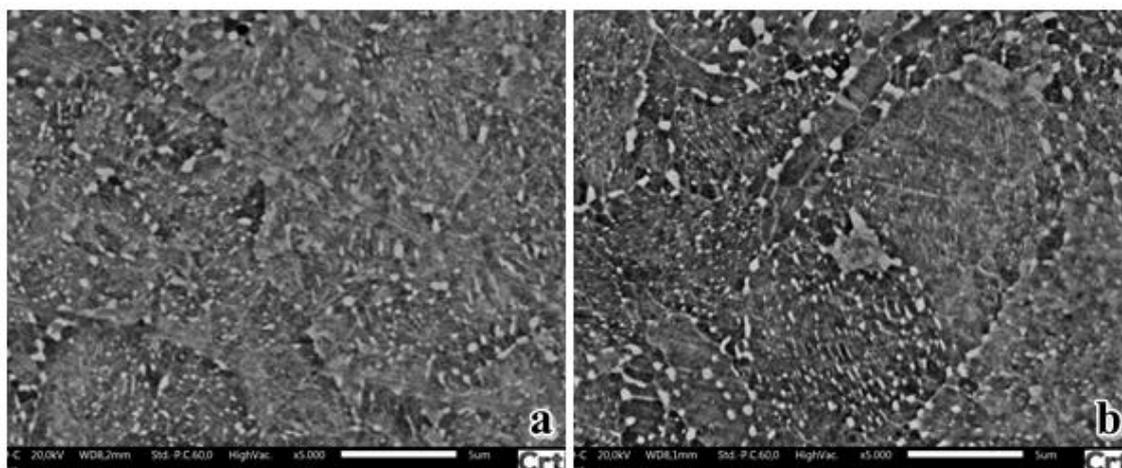


Figura 10. Micrografias do MEV: aço SAE 1045 temperado e resfriado em água 900°C por 9 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

A Figura 11 exibe as imagens da amostra temperada a 875°C por 15 minutos, resfriada em salmoura.

A imagens da Figura 11 mostram com grande nitidez grãos de martensita, o que já era esperado devido ao resfriamento brusco em salmoura [13]. A microestrutura do aço apresentando martensita evidencia grãos mais alongados, em forma de agulhas, apontando uma estrutura tetragonal de corpo centrado, que tem uma rede cristalina bastante tensionada e distorcida, o que traz o aumento de dureza e resistência mecânica [19]. Juntamente aos grãos alongados de martensita, observam-se placas um pouco mais largas que, possivelmente, são de bainita [13].

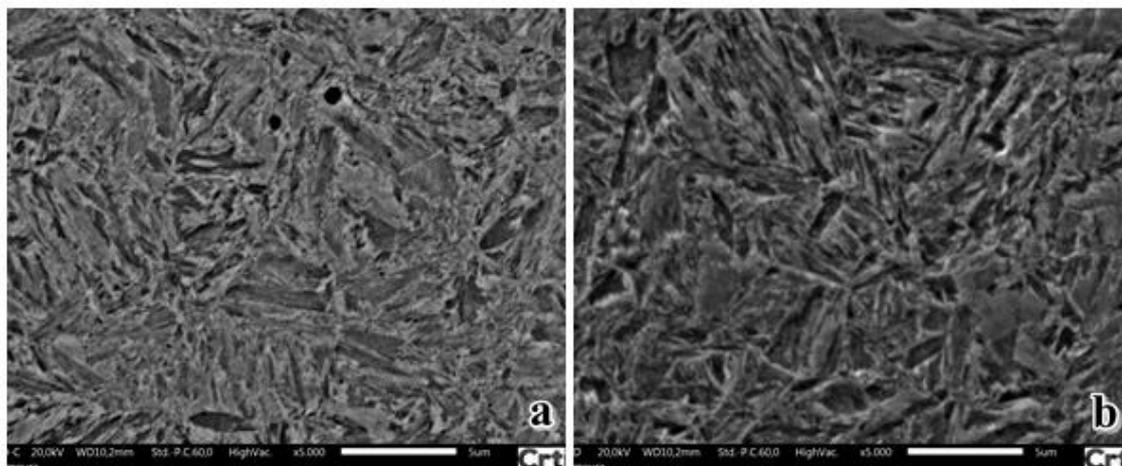


Figura 11. Micrografias do MEV: aço SAE 1045 temperado e resfriado em salmoura, a 875°C por 15 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

Após a têmpera, a amostra que obteve maior dureza foi a temperada em 875°C por 15 minutos, Figura 11, que teve a microestrutura confirmada pela microscopia, apresentando o microconstituente mais duro, que é a martensita. O aço recebeu o revenimento dessa amostra, ou seja, todas as demais amostras da segunda etapa passaram por têmpera na mesma temperatura, tempo e meio de resfriamento, e depois foram revenidas em temperatura e tempos diferentes.

A Figura 12 apresenta as amostras temperadas e revenidas durante 20 minutos com temperatura de 250°C.

As imagens das microscopias da Figura 12 tratam das amostras revenidas a 250°C. De acordo com (Colpaert [13]), a microestrutura refere-se a uma martensita grosseira, tornando o aço extremamente duro e quebradiço, ou seja, com pouca tenacidade e grande fragilidade.

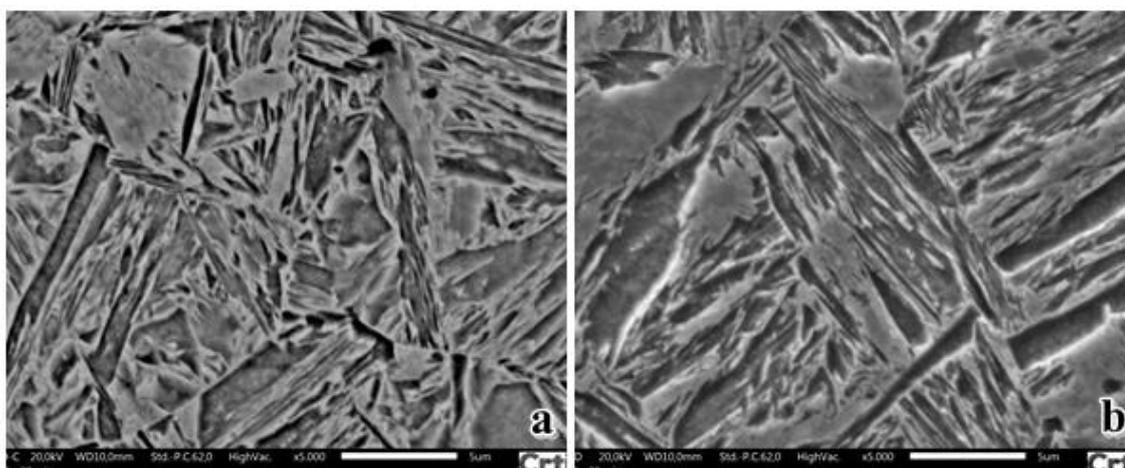


Figura 12. Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 250°C por 20 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

A Figura 13 apresenta as amostras temperadas e revenidas durante 20 minutos com temperatura de 325°C.

As imagens a e b da Figura 13 assemelham-se com o constituinte ferrita bainítica, sendo explicadas pela difusão de carbono quando se redistribui na austenita em razão da presença do elemento químico silício, que inibe a precipitação de cementita [18]. Observam-se também grãos de martensita grosseiras e os pontos pretos podem ser porosidade ou inclusões de oxidação [4].

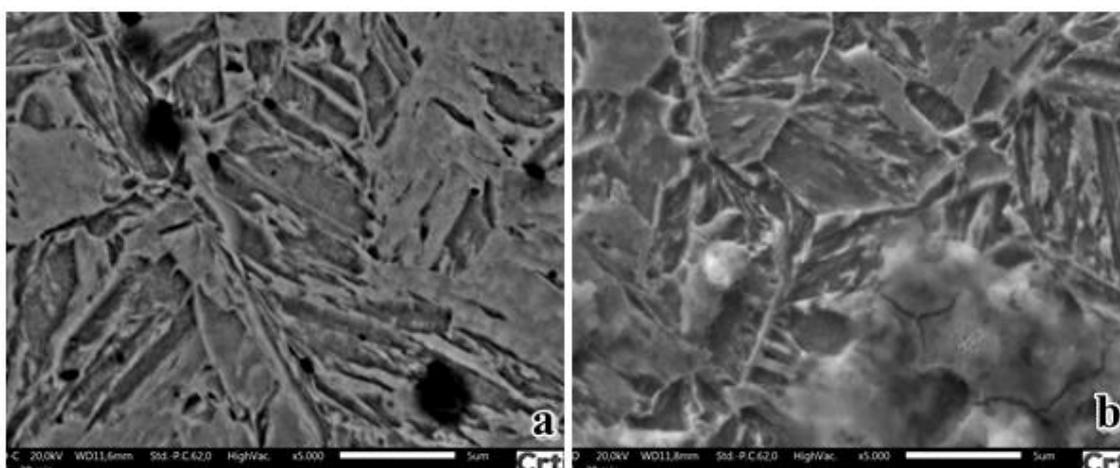


Figura 13. Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido à 325°C por 20 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

A Figura 14 apresenta as amostras temperadas e revenidas durante 20 minutos com temperatura de 400°C.

Pelas imagens da Figura 14, nota-se diferença entre as demais, pois nelas aparecem placas maiores de ferrita poligonal, grãos mais refinados de martensita e austenita retida no centro da imagem [18] [20].

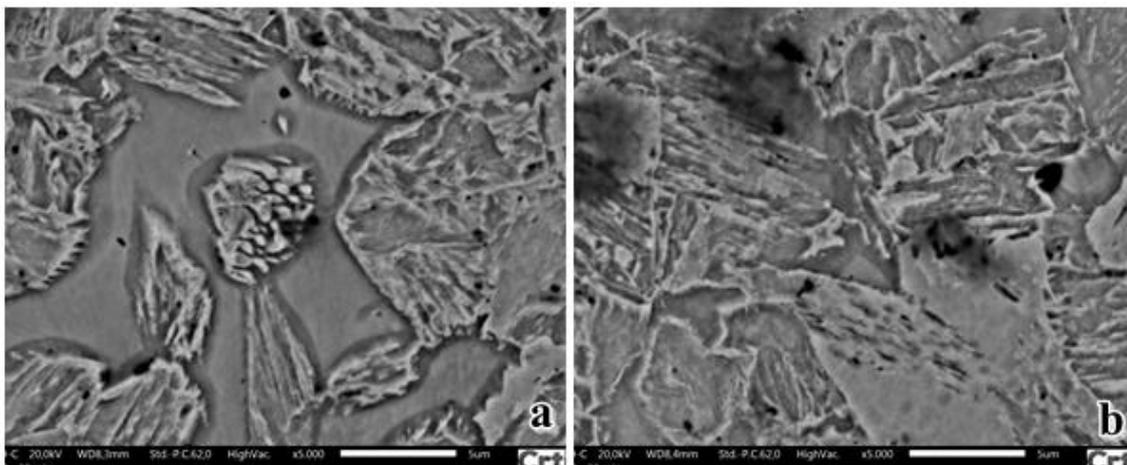


Figura 14. Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 400°C por 20 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

A Figura 15 apresenta amostras temperadas e revenidas durante 30 minutos com temperatura de 250°C.

Com o aumento do tempo de revenimento no forno, nota-se, Figura 15, que a estrutura ficou mais refinada na temperatura de 250°C, apresentando martensita acicular [18]. Observam-se algumas regiões com estrutura grosseira com um tamanho maior, que, para alguns autores, são conhecidas como o microconstituente martensita-austenita, que, aparentemente, tem a morfologia da austenita, mas com microdureza da martensita [18], [21], [14].

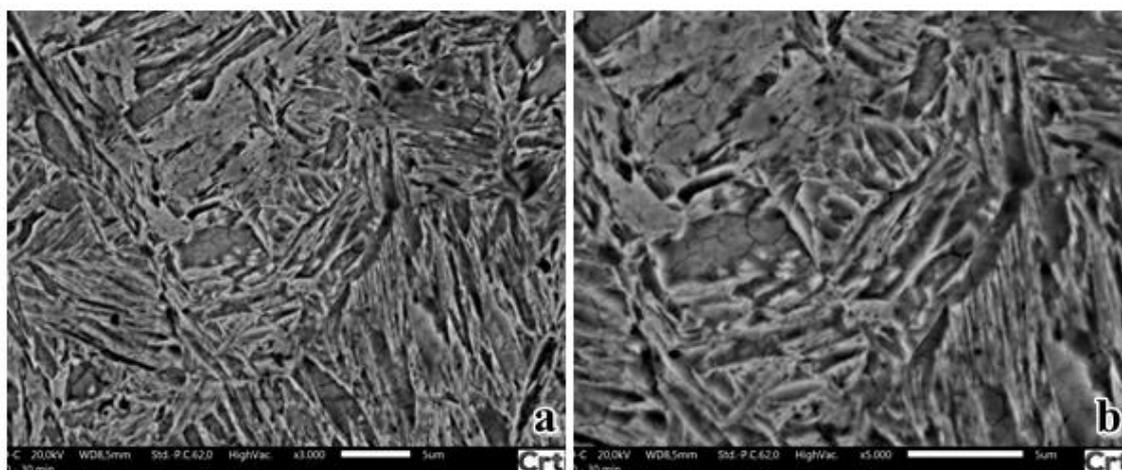


Figura 15. Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido à 250°C por 30 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

A Figura 16 apresenta amostras temperadas e revenidas durante 30 minutos com temperatura de 325°C.

No entanto, conforme a temperatura vai aumentando, maior o tamanho da estrutura presentes no aço, sendo possível observar, inclusive, no fundo da imagem, o contorno dos grãos em linhas bem finas, mais aparentes na Figura 15. Os microconstituintes presentes não diferem dos microconstituintes das Figuras 12, 13 e 14.

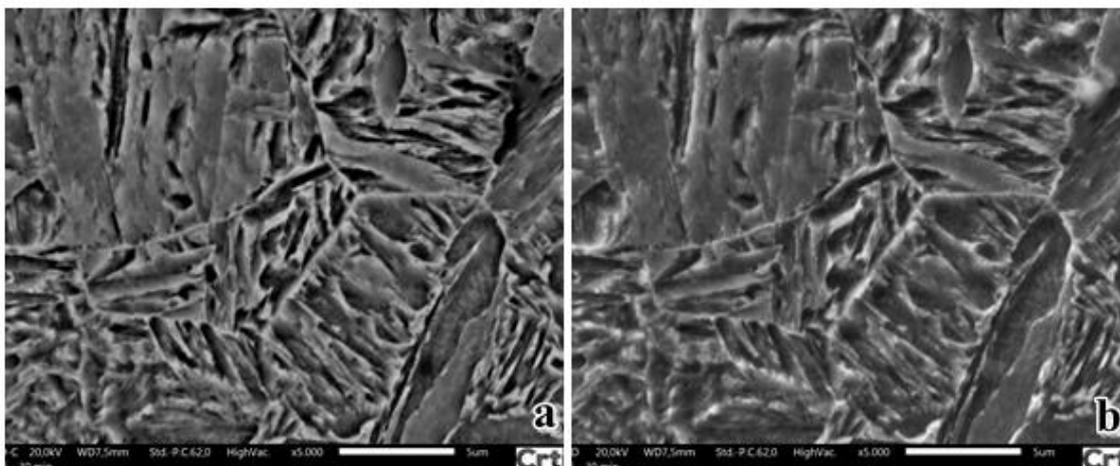


Figura 16. Micrografias do MEV: aço SAE 1045 revenido a 325°C por 30 minutos, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

Com exceção das imagens da Figura 15, que tiveram um leve refino na estrutura, os demais apresentaram um crescimento na estrutura do aço muito parecido com um crescimento de grãos, que a essa temperatura não seria possível [22].

A Figura 17 apresenta amostra temperada e revenida durante 30 minutos com temperatura de 400°C.

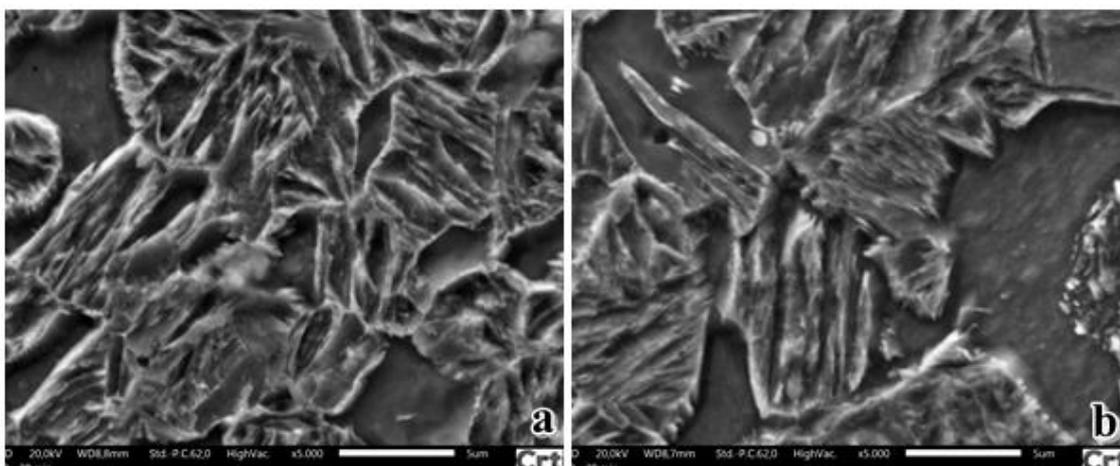


Figura 17. Micrografia de MEV do aço SAE 1045 revenido a 400°C, ataque com Nital 3%, ampliação de 5000x.

Relacionando os microconstituintes presentes, o refino na amostra revenida a 250°C, Figura 15, e o aumento do tamanho da estrutura nas demais imagens, Figuras 16 e 17, aos valores de dureza apresentados na Tabela 3, viu-se que os maiores valores de dureza são das amostras revenidas a 250°C, que exibiram estrutura refinada,

principalmente a revenida durante 30 minutos, que, em sua microestrutura, apresentou martensita [20], [22].

### **3.6 Conclusões**

Após a têmpera, foram obtidos excelentes resultados em relação ao aumento da dureza no aço SAE 1045, principalmente nas amostras austenitizadas a 875°C por 15 minutos, que apresentaram maiores valores de dureza com resfriamento em salmoura. No entanto, nenhuma variável mostrou influência com nível de significância de 5% sobre o crescimento da dureza, sendo que ao nível de 10%, a interação meio de resfriamento x temperatura mostrou influência. O revenimento tende a diminuir a dureza do aço, assim como as tensões provenientes da têmpera. Neste caso, a amostra que mostrou maior dureza foi a revenida na temperatura de 250°C por 30 minutos, apresentando martensita acicular, com algumas regiões com estrutura grosseira, sendo o microconstituente martensita-austenita, pois aparentemente tem a morfologia da austenita, mas com microdureza da martensita. A análise de variância mostrou que a um nível de significância de 5% apenas a temperatura afetou a dureza e que também houve interação entre o tempo e a temperatura de revenimento.

A microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura comprovaram a presença de martensita, microconstituente que proporciona maior dureza do aço.

### **3.7 Agradecimentos**

Agradeço à Universidade de Rio Verde, pela disponibilização de ferramentas, equipamentos e laboratórios, que foram essenciais para o término dos experimentos. Ao IF Goiano, pela liberação de créditos para as análises microscópicas na CRTI, à equipe da CRTI por ter me recebido e feito algumas preparações de amostras e as microscopias. E aos professores Idalci Cruvinel dos Reis e Warley Augusto Pereira, que dispuseram de seu tempo e conhecimentos para orientação e ajuda.

### **3.8 Referências Bibliográficas**

[1] AÇOBRASIL. A indústria do aço no Brasil. Confederação Nacional do aço. Instituto aço Brasil. Brasília, Distrito Federal, p.64, 2017.

- [2] TSCHIPTSCHIN, André P. Mundo dos aços especiais. Processo de Fabricação. Gerdau, 2019.
- [3] GALLO, Giulliano B. Influência do Tratamento Térmico sobre a Tenacidade de um Aço AISI SAE 1045 com Médio Teor de Carbono Avaliado por Ensaio de Impacto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, p. 115, 2006.
- [4] FREITAS, Brenda, J. M. Estudo da influência das temperaturas de austenitização na dureza dos aços AISI d6 e SAE 1045. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p.89. 2016.
- [5] CALLISTER, Jr. Willian D.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [6] CALLISTER, J. Willian. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- [7] CABALLERO, F.G. et al. Modelling of Kinetics of Austenite Formation in Steels with Different Initial Microstructures. ISIJ International, Vol. 41, p. 10, 2001.
- [8] STEIN, Cristiano R.; HERMENEGILDO, Tahiana F.; ARAÚJO, Fernando G. S.; COTA, André B. Efeito da Rápida Austenitização sobre as Propriedades Mecânicas de um Aço SAE 1045. Revista Escola de Minas. Ouro Preto, v.58, n.1, jan.-mar. 2005.
- [9] MARTINS, Marcelo. Temperabilidade Jominy e influência do revenido sobre a dureza - um estudo em aços estruturais nacionais. Universidade Federal de Santa Catarina, p.115, 2002.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR ISSO 6892. Materiais metálicos - Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio a temperatura ambiente. 2013 incorpora a Errata 2 de 17.09.2018.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 172/2000. Critérios de classificação dos aços. Válida a partir de 30/11/2000.
- [12] GALDÂMEZ, E.V.C. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002
- [13] COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4. Ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- [14] ZHU, H. W. et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of 1045 Steel Modified with (NbTi)C Nanoparticles. Revista Materials Science & Engineering A , p. 24, 2018.
- [15] KHALIL, M. e TOPPER, T. H. Prediction of crack opening stress levels for 1045 quenched and tempered steel under service loading spectra. Revista Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, p. 3-10, 2005.
- [16] ARAÚJO, M. D. Influência do Tratamento Térmico na Microestrutura do Aço Abnt/Sae 1045. Universidade de Rio Verde. Rio Verde, Goiás, p. 73. 2012.
- [17] SHACKELFORD, James F. Introdução à ciência dos materiais para engenheiros. 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [18] SOUZA, Ederson. Cinética e morfologia das transformações de fase em aços trip contendo teores variáveis de Si e Mn. Instituto Superior Tupy. Joinville. 2009
- [19] PAVANATI, H. C. Introdução à tecnologia dos materiais. Instituto Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2010.
- [20] BIALOBRZESKA, B. et al. The influence of austenitization temperature on phase transformations of supercooled austenite in low-alloy steels with high resistance to

abrasion wear. Revista Archives of Civil and Mechanical Engineering, p. 413-429, 2018.

[21] GIRALT, E. Bainitic transformations in TRIP-assited steels its influence on mechanical properties. PH.D.Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, Mar. 1999.

[22] CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

[23] TAN, C. et al. Microstructural Evolution, nanoprecipitation behavior and mechanical properties of selective laser melted high-performance grade 300-maraging steel, Revista Material and Design, p. 23-34, 2017.

[24] GERDAU GDD1 SAE 1045. Catálogo. Disponível <<https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-1045.pdf>>. Acesso: 10/08/2020.

#### 4. CONCLUSÃO GERAL

Após a têmpera, foram obtidos excelentes resultados em relação ao aumento da dureza no aço SAE 1045, principalmente nas amostras austenitizadas a 875°C por 15 minutos, que apresentaram maiores valores de dureza com resfriamento em salmoura. No entanto, nenhuma variável mostrou influência com nível de significância de 5% sobre o crescimento da dureza, sendo que ao nível de 10%, a interação meio de resfriamento x temperatura mostrou influência. O revenimento tende a diminuir a dureza do aço, assim como as tensões provenientes da têmpera. Neste caso, a amostra que mostrou maior dureza foi a revenida na temperatura de 250°C por 30 minutos, apresentando martensita acicular, com algumas regiões com estrutura grosseira, sendo o microconstituente martensita-austenita, pois aparentemente tem a morfologia da austenita, mas com microdureza da martensita. A análise de variância mostrou que a um nível de significância de 5% apenas a temperatura afetou a dureza e que também houve interação entre o tempo e a temperatura de revenimento.

A microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura comprovaram a presença de martensita, microconstituente que proporciona maior dureza do aço.

O ensaio de tração foi realizado em todas as amostras tratadas e revenidas, no entanto como as amostras resultantes do tratamento térmico de têmpera e revenimento apresentaram maior dureza que a ferramenta da máquina de tração, as amostras de aço danificaram a ferramenta (garra), o que ocasionou o escorregamento das amostras de aço na máquina, impossibilitando o resultado esperado deste ensaio.