

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FILIPPE LOURENÇO DAL RI

Título: Fragilização da Martensita Revenida no Aço SAE 4140

São Carlos

2023

FILIPPE LOURENÇO DAL RI

Título: Fragilização da Martensita Revenida no Aço SAE 4140

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. José Benedito Marcomini

São Carlos

2023

Autorizo a reprodução total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D136f Dal Ri, Filipe Lourenço
Fragilização da Martensita Revenida no Aço SAE 4140 / Filipe Lourenço Dal Ri; orientador José Benedito Marcomini. São Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

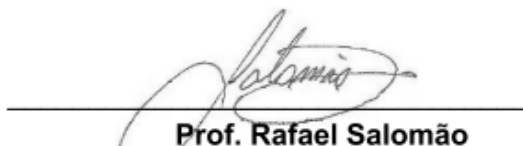
1. Fragilização. 2. Martensita Revenida. 3. Aço SAE 4140. 4. Tratamento Térmico. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO

| |
|---|
| Candidato / Student: Filipe Lourenço Dal RI |
| Título do TCC / Title: Fragilização da Martensita Revenida no aço SAE 4140 |
| Data de defesa / Date: 11/07/2023 |

| Comissão Julgadora / Examining committee | Resultado / Result |
|--|---------------------------|
| Professor José Benedito Marcomini (orientador) | Aprovado |
| Instituição / Affiliation: EESC - SMM | |
| Professor Kleber Francisco Espôsto | Aprovado |
| Instituição / Affiliation: EESC - Departamento de Engenharia de Produção | |
| Mestre Amanda Akemy Komorizono | Aprovado |
| Instituição / Affiliation: EESC - SMM | |

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee



Prof. Rafael Salomão

Coordenador da Disciplina SMM0325 - Trabalho de Conclusão de Curso

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho,
primeiramente a Deus, aos meus
pais: Geriel Dal Ri e Luciana
Lourenço Dal Ri, meu irmão Lucas
Lourenço Dal Ri, minha namorada
Thainá Cristina de Gouvêa e meus
amigos: Leandro Furlan Bessa,
Isabella Pedroso Dal Ri e João
Vitor Natalício França.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, por ter me ajudado durante toda minha vida, em especial durante os momentos mais sombrios desta.

Á minha Mãe, que já dorme na esperança da Vida Eterna.

Aos meus familiares e amigos que me deram forças e apoio para chegar até ao fim desse trabalho.

Ao Dr.José Benedito Marcomini, pela paciência que teve para comigo e me auxiliou nas análises e ensaios que foram realizados para este trabalho.

Á professora Lauralice de Campos Canalle, por ter me fornecido as amostras.

Aos meus companheiros de Fórmula SAE, que me proporcionaram momentos belos e inesquecíveis na minha vida.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura, que não mediram esforços para me ajudar na preparação das amostras e na utilização dos equipamentos.

Aos meus companheiros de trabalho na John Bean Technologies Corporation, pelo apoio que me deram nos dias que precisei me ausentar do serviço para dar seguimento neste trabalho.

Aos meus colegas da turma 016, por todo o companheirismo e camaradagem que recebi ao longo desses anos.

“Que diremos, pois, a estas coisas? Se Deus é por nós, quem será contra nós?” (Romanos 8:31)

Apóstolo Paulo

RESUMO

DAL RI, F. L., **Título: Fragilização da Martensita Revenida no aço SAE 4140**, 2023. 75 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Este trabalho teve por objetivo caracterizar o fenômeno da fragilização da martensita revenida no aço SAE 4140, por meio de ensaio de dureza, impacto, análise microestrutural em microscópio óptico e microscopia eletrônica de varredura. Os corpos de prova do aço SAE 4140, laminado, foram austenitizado em 900°C, temperados em óleo e posteriormente revenidos em 200°C, 300°C, 370°C e 450°C. Foram caracterizadas as microestruturas e as propriedades mecânicas desse aço nas condições laminado e temperado revenido. Esse estudo detectou o fenômeno da fragilização da martensita revenida entre as temperaturas de 200°C a 370°C. Devido ao fato que a amostra austenitizada à 900°C e revenida à 200°C apresentou uma manutenção na energia absorvida no ensaio de impacto e, no ensaio de dureza apresentou uma queda contínua da dureza, evidenciou assim a ocorrência de algum tipo de fragilização, que no caso era a martensita revenida, o qual foi corroborado pela análise da microscopia eletrônica de varredura, que evidenciou os mecanismos de fraturas que estavam agindo nos corpos de prova revenido sem 300°C e 450°C.

Palavras-chave: Fragilização, martensita revenida, aço SAE 4140, tratamento térmico

ABSTRACT

DAL RI, F. L. **Embrittlement of Tempered Martensite in SAE 4149 Alloy Steel**, 2023.

75 p. Dissertation (Undergraduate Thesis) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2023.

This work aimed to characterize the phenomenon of embrittlement of tempered martensite in SAE 4140 alloy steel, through hardness testing, impact testing, microstructural analysis using an optical microscope and scanning electron microscopy. The specimens of rolled SAE 4140 alloy steel were austenitized at 900°C, quenched in oil, and subsequently tempered at 200°C, 300°C, 370°C and 450°C. The microstructure and mechanical properties of this steel were characterized in the rolled and tempered conditions. This study detected the phenomenon of embrittlement of tempered martensite in the temperature range of 200°C to 370°C. The sample austenitized at 900°C and tempered at 200°C showed a maintenance in energy absorption in the impact test and a continuous decrease in hardness in the hardness test, thus indicating the occurrence of some type of embrittlement, which in this case was the tempered martensite, as corroborated by the analysis of scanning electron microscopy, which revealed the fracture mechanism acting in the specimens tempered at 300°C and 450°C

Keywords: Embrittlement, tempered martensite, SAE 4140 alloy steel, heat treatment

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Diagrama de fases do sistema ferro-carbono | 6 |
| Figura 2 – Diagrama TRC para o aço 4140..... | 9 |
| Figura 3 - Esquema da deformação e Bain na formação da estrutura da Martensita | 10 |
| Figura 4 – Diagrama de transformação por resfriamento contínuo para aço-liga (tipo 4140) | 11 |
| Figura 5 – Formação da martensita em relação aos grãos austeníticos | 12 |
| Figura 6 - Formas da martensita, de acordo com o teor de carbono. | 12 |
| Figura 7 – Inclusão de óxido de alumina globular em um aço baixo carbono acalmado ao alumínio.. | 14 |
| Figura 8 - Composição dos aços usados por Horn e Ritchie | 15 |
| Figura 9 - Mecanismos de fratura | 16 |
| Figura 10 - Mecanismos de Fratura Obtidos por Horn e Rictchie | 17 |
| Figura 11 - Especificação da Norma ASTM E23 - 16b | 23 |
| Figura 12 - Corpo de Prova..... | 23 |
| Figura 13 - Corpos de Provas "Amarrados" | 24 |
| Figura 14 - Forno de Tempera..... | 25 |
| Figura 15 - Forno de Revenimento | 26 |
| Figura 16 - Serra..... | 27 |
| Figura 17- Equipamento para embutimento | 27 |
| Figura 18 - Amostra laminado bruto na direção perpendicular..... | 28 |
| Figura 19- Amostras Metalografia | 29 |
| Figura 20 - Foto do Microscópio..... | 30 |
| Figura 21 - Equipamento para ensaio de impacto | 32 |
| Figura 22 - Equipamento para ensaio de Dureza | 34 |
| Figura 23 - Microscópio Eletrônico de Varredura | 36 |
| Figura 24 - Equipamento para EDS | 37 |
| Figura 25 - Superfície de fratura dos corpos de prova revenidos à 300°C (esquerda) e 450°C (direita) | 37 |
| Figura 26 - Metalografia da amostra bruta laminada, extraída na direção transversal à direção de laminação. Fases presentes: estruturas bainíticas, ferrita e perlita. Nital 2%. Aumento 10x. | 38 |
| Figura 27- Corpo de prova autenitizado em 900°C e revenido a 200°C. Fases presentes: Martensita, austenita retida, bainita. Nital 2%. Aumento 20X..... | 39 |
| Figura 28 – Corpo de prova autenitizado em 900°C e revenido a 300°C. Fases presentes: Martensita, austenita retida, bainita. Nital 2%. Aumento 50X..... | 40 |
| Figura 29- Corpo de prova autenitizado em 900°C e revenido a 370°C. Fases presentes: Martensita, austenita retida, bainita. Nital 2%. Aumento 50X..... | 41 |
| Figura 30- Corpo de prova autenitizado em 900°C e revenido a 450°C. Fases presentes: Martensita, austenita retida, bainita. Nital 2%. Aumento 50X..... | 42 |
| Figura 31 – Inclusões (Aumento 100x)..... | 43 |
| Figura 32 - Energia de Impacto médio X condição de revenimento..... | 46 |
| Figura 33 - Dureza média X Temperatura de Revenimento | 49 |
| Figura 34 - Superfície de Fratura do corpo de prova revenido à 300°C. Micromecanismo de fratura predominantemente intergranular. | 50 |
| Figura 35 – Detalhe da superfície de fratura do corpo de prova revenido à 300°C, mostrando as facetas dos grãos, o que caracteriza o micromecanismo intergranular de fratura. | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 36 - Superfície de fratura do corpo de prova revenido à 450°C, micromecanismo predominantemente transgranular, indicado pelas deformações plásticas (setas amarelas). | 52 |
| Figura 37 – Detalhe da superfície do corpo de prova revenido à 450°C. As setas indicam alvéolos com grande deformação plástica: micromecanismo alveolar de fratura (micromecanismo de alta energia).53 | 53 |
| Figura 38 - Inclusão esférica na superfície de fratura do corpo de prova revenido à 300°C..... | 54 |
| Figura 39 - EDS área 1 | 55 |
| Figura 40 - EDS área 2..... | 55 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Composição do aço SAE 4140..... | 2 |
| Tabela 2 – Sistemas de Designação AISI/SAE e UNS e Faixas de composição para Aços Comuns ao Carbono e Vários Aços de Baixa Liga | 7 |
| Tabela 3 - Composição química do aço baixo carbono acalmado ao alumínio | 14 |
| Tabela 4 – Estágios de Revenimento | 18 |
| Tabela 5 – Sequência de precipitação dos carbonetos | 20 |
| Tabela 6 - Detalhes do tratamento térmico | 25 |
| Tabela 7 - Resultados da análise de inclusões, conforme ASTM E 45 | 43 |
| Tabela 8 - Resultados - Ensaio de Impacto | 45 |
| Tabela 9 - Durezas medidas | 47 |
| Tabela 10 – Resultados Ensaio de Dureza | 48 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|-------|---|--|
| ABNT | - | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| FMR | - | Fragilização da martensita revenida |
| TCC | - | Tetragonal de Corpo Centrado |
| KIc | - | Tenacidade à Fratura |
| TTT | - | Temperatura – tempo – temperatura |
| Min | - | Minutos |
| EESC | - | Escola de Engenharia de São Carlos |
| MEV | - | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| EDS | - | Espectroscopia por Energia Dispersiva |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----|---------------|
| °C | Graus Celsius |
| K | Graus Kelvin |
| mm | Milímetro |
| μm | Micrómetro |
| J | Joule |
| HRC | Rockwell C |

Sumário

| | | |
|------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. | Aço SAE 4140..... | 1 |
| 1.2. | Aplicações do aço SAE 4140 | 2 |
| 1.1. | Objetivos | 3 |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1. | Definição de aço..... | 4 |
| 2.4 | Tratamento Térmico..... | 7 |
| 2.5 | Martensita..... | 9 |
| 2.6 | Inclusão | 13 |
| 2.7 | Fragilização da Martensita Revenida | 14 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 22 |
| 3.1 | Composição química..... | 22 |
| 3.2 | Preparação dos Corpos de Prova para ensaio de impacto Charpy..... | 22 |
| 3.3 | Tratamento Térmico..... | 24 |
| 3.4 | Metalografia | 26 |
| 3.5 | Ensaio de Impacto Charpy | 31 |
| 3.6 | Ensaio de Dureza..... | 32 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 38 |
| 4.1 | Metalografia da amostra laminada bruta na direção perpendicular..... | 38 |
| 4.2 | Metalografia das amostras tratadas | 39 |
| 4.4 | Resultados do Ensaio de Impacto Charpy..... | 44 |
| 4.5 | Resultados do Ensaio de Dureza | 47 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 56 |
| 6 | CONCLUSÃO | 56 |
| 7 | SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS | 57 |

1. INTRODUÇÃO

O Aço SAE 4140 é um aço de alta resistência que é amplamente utilizado em diversos tipos de indústrias ao redor do mundo. Isso decorre do fato que esse material possui excelentes propriedades mecânicas, além de que possuir uma capacidade de resistir a condições extremas. Esse aço pertence à classe de aços liga e de médio carbono. Sendo assim, o SAE 4140 possui uma composição química específica que lhe confere suas características únicas.

O fenômeno da Fragilização da Martensita Revenida é mais um caso dentre os diversos fenômenos de fragilização existentes. Esse fenômeno se caracteriza pela diminuição da tenacidade à fratura quando alguns aços são revenidos em uma determinada faixa de temperatura. Muitos autores estudaram esse tema (para diversos aços diferentes), relacionando esse fenômeno com a decomposição da austenita retida, o micro mecanismo de fratura dos aços, temperatura de austenitização, entre outros; sendo esses últimos as possíveis causas para o aparecimento dessa ocorrência.

1.1. Aço SAE 4140

Seguindo a definição do autor William D. Callister Jr., o aço SAE 4140 é um aço de médio carbono e de baixa liga, sendo assim utilizado na indústria por causa de suas propriedades mecânicas favoráveis (as aplicações serão detalhadas mais a frente). A sigla SAE refere-se à Sociedade dos Engenheiros Automotivos (Society Of Automotive Engineers), a qual estabelece padrões e especificações técnicas para materiais utilizados na indústria automotiva.

O número 4140 do aço nos define a composição química presente no aço escolhido, e as propriedades mecânicas esperadas desse material; sendo assim o seu significado:

- Composição química: O número “41” indica que esse aço possui os elementos de liga Cromo e Molibdênio na sua estrutura. O número “40” que esse aço possui cerca de 0,40% de carbono em sua estrutura. Geralmente, o aço SAE 4140 apresenta em sua estrutura cerca de 1% de cromo, 0,25% de molibdênio e 0,40% de carbono.
- Propriedades mecânicas: O aço SAE 4140 possui uma alta resistência mecânica, dureza e tenacidade à fratura, após um tratamento térmico adequado (que será

exposto mais à frente), esse aço pode atingir um módulo de Young de 850 Mpa e dureza na faixa de 22 a 35 HRC.

Tabela 1 – Composição do aço SAE 4140

■ **ABTN | ASTM | SAE | AISI: 4140**

■ **DIN | WNr: 1.7225**

■ **Composição química:**

| C % | Mn % | Cr % | Ni % | Mo % | OUTROS % |
|------|------|------|------|------|----------|
| 0,40 | 0,90 | 0,95 | - | 0,20 | - |

Fonte: VillaresMetals

1.2. Aplicações do aço SAE 4140

As aplicações do aço SAE 4140 são bem variadas, pois devido à sua alta resistência mecânica, ele se torna uma ótima opção para ser usado na indústria de forma geral. Algumas das aplicações desse aço são:

- I. Indústria automotiva: a sigla SAE no aço já indica que ele tem uso na indústria automotiva, sendo utilizado, principalmente nos seguintes itens:
 - a. Virabrequim: A alta resistência mecânica e a capacidade de suportar altas temperaturas torna esse aço adequado para suportar as forças e tensões geradas durante o funcionamento do motor a combustão
 - b. Engrenagens: A alta resistência mecânica, à fadiga e ao desgaste torna-o adequado para ser utilizado na fabricação de engrenagens para componentes de transmissão de veículos, como diferenciais, caixas de câmbio, entre outros. O aço tem a capacidade de suportar as forças de impacto presentes nesses componentes [FERREIRA BRAGA, 2005].
- II. Indústria petróleo e gás [SCHMIDT, 2021]:

- a. Equipamentos de perfuração: o aço SAE 4140 é utilizado na fabricação, principalmente, de brocas para perfuração de poços de petróleo e gás. A alta resistência à tração, tenacidade à fratura e a capacidade de suportar altas temperaturas e pressão tornam-o ideal para essa finalidade.
- b. Conexões e Flanges: esse material também é utilizado na fabricação de conexões e flanges para a indústria de petróleo e gás, pois possui uma alta resistência à corrosão e mecânica, que são duas características requeridas para esse setor.

III. Indústria Aeroespacial [ÂNGELO, 2021]:

- a. Componentes estruturais: o aço SAE 4140 é utilizado na produção de componentes estruturais das aeronaves, como suportes de asa, vigas e peças de reforço, pois sua alta resistência mecânica e tenacidade à fratura são necessários para garantir a segurança e durabilidade das estruturas aeroespaciais.
- b. Sistema de trem de pouso: utilizado para produzir as hastes, eixos e engrenagens que vão montados nesse sistema. Durante o pouso e aterrissagem, o sistema suporta cargas extremas, o que faz necessária a utilização de uma matéria prima com alta resistência mecânica, que é suprido por esse aço.

IV. Indústria de construção civil: Utilizado na construção de estruturas e equipamentos pesados, como vigas, eixos e conexões. Sua alta resistência mecânica o torna adequado para ser utilizado em equipamentos de construção, como pontes e guindastes, que estão sob tensões extremas enquanto são operados [FACO, 2005].

V. Indústria de moldes e matrizes: utilizado na produção de moldes e matrizes para a fabricação de peças metálicas, pois sua alta resistência ao desgaste e a capacidade de receber tratamento térmico tornam-o ideal para essa aplicação

1.1. Objetivos

Este trabalho teve por objetivo caracterizar o fenômeno da fragilização da martensita revenida (FMR) no aço SAE 4140, austenitizado em 900°C, temperado em óleo e revenido nas

seguintes temperaturas: 200°C, 300°C, 370°C e 450°C. Foram utilizados os seguintes parâmetros para esse estudo:

1. Variação da energia absorvida no ensaio de impacto tipo Charpy, em função da temperatura de revenimento
2. Análise das durezas dos corpos de prova
3. Análise Metalográfica das fases presentes no tratamento térmico e de inclusões na peça bruta (advinda do processo de laminação).

A seleção desse aço para o estudo ocorreu devido a um outro trabalho de TCC, de um aluno da professora Dra. Luralice de Campos Canalle, que não foi finalizado; dessa forma, a professora gentilmente me entregou as amostras necessárias para a realização deste trabalho. Somado a isso, o interesse do professor Dr. José Benedito Marcomini em estudar esse fenômeno nesse aço, devido ao baixo teor de elementos de liga, fazendo com que o aço SAE 4140 apresente uma susceptibilidade à fragilização da martensita revenida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição de aço

Segundo William D. Callister Jr., autor do livro “Materials Science and Engineering: An Introduction”, o aço é uma liga de ferro carbono na qual o carbono é o principal elemento de liga. O teor do carbono no aço pode variar de 0,02% até 2,1% em peso; o aço também pode conter diversos outros elementos de ligas (em menores quantidades) como silício, cromo, molibdênio, enxofre, entre outros. (CALLISTER, 2002)

Podemos complementar essa definição com um trecho do livro “Aços e Ferros Fundidos”, no qual diz “Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes de processos de fabricação” (CHIAVERINI, 2008)

As propriedades do aço são influenciadas pela presença desses elementos de liga na estrutura, assim como os processos de fabricação aos quais ele pode ser submetido, por exemplo, a presença de enxofre nos rebites que compunham a estrutura do navio Titanic,

aumentava sua temperatura de transição frágil-dúctil, de modo que essa transição foi fatal para o navio que navegava em águas geladas (LEIGHLY e BRAMFITT, 2001).

Existem diferentes tipos de classificação para os aços, apenas com base no teor de carbono e dos elementos de ligas presentes na microestrutura. As classificações apenas com base na microestrutura são (COLPAERT, 2018):

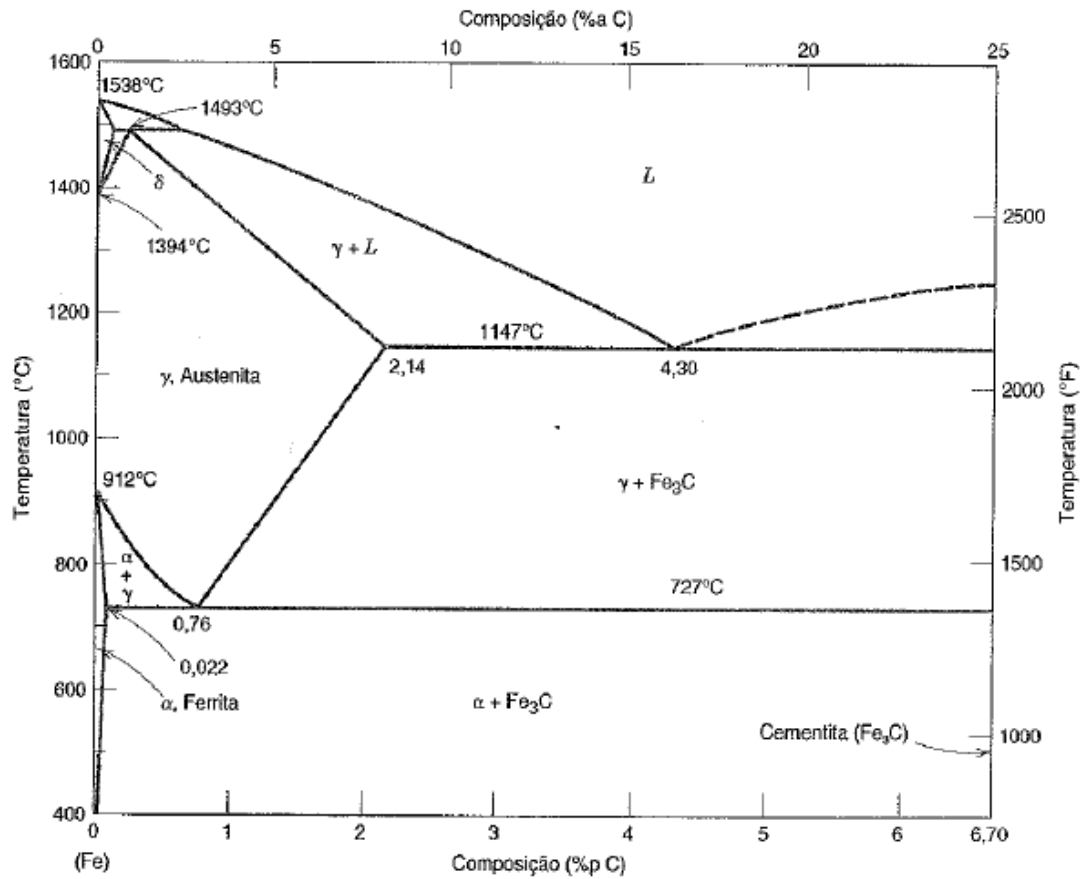
- Aço de baixo carbono: Possui um teor de carbono abaixo de 0,25%
- Aço de médio carbono: Possui um teor de carbono entre 0,25% e 0,60%
- Aço de alto carbono: Possui um teor de carbono entre 0,60% e 1,0%

Como dito anteriormente, as propriedades mecânicas variam de acordo com a quantidade de carbono presente na microestrutura do aço, permitindo dessa forma aplicar cada um deles em situações específicas, como por exemplo (HONEYCOMBE e BHADSHIA 1996).

- Aço de baixo carbono: apresenta uma boa soldabilidade, ductilidade e tenacidade, sendo assim utilizado em aplicações que necessitam passar pelo processo de conformação, por exemplo a produção de chapas metálicas, tubos e fios (processos de fabricação de laminação e trefilação por exemplo).
- Aço de médio carbono: apresenta uma boa combinação de resistência mecânica e tenacidade, sendo assim utilizado em aplicações que requerem forças e resistências moderadas, por exemplo em eixos e engrenagens.
- Aço de alto carbono: apresenta uma alta dureza e resistência mecânica, porém é possui uma ductibilidade menor se comparados aos aços anteriores, sendo utilizado em aplicações que necessitam de uma alta resistência mecânica, por exemplo, ferramentas de corte e molas.

A figura 1 apresenta o diagrama Fe-Fe₃C, que é o diagrama de fases para resfriamento lento, de aços (até 2,14% em peso de C) e ferros fundidos (acima de 2,14% em peso de C).

Figura 1 – Diagrama de fases do sistema ferro-carbono



Fonte: CALLISTER, 2002

Além da classificação com relação ao carbono, temos também a classificação em relação aos elementos de liga, como mostrado na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Sistemas de Designação AISI/SAE e UNS e Faixas de composição para Aços Comuns ao Carbono e Vários Aços de Baixa Liga

| Designação AISI/SAE ^a | Designação UNS | Faixas de Composição (%p de Elementos de Liga em Adição ao C) ^b | | | |
|-------------------------------------|-------------------|---|-----------|-----------|--|
| | | Ni | Cr | Mo | Outros |
| 10xx, Comum ao Carbono | G10xx0 | | | | |
| 11xx, Fácil usinagem | G11xx0 | | | | 0,08-0,33S |
| 12xx, Fácil usinagem | G12xx0 | | | | 0,10-0,35S, 0,04-0,12P 1,60-1,90Mn |
| 13xx | G13xx0 | | | | |
| 40xx | G40xx0 | | | 0,20-0,30 | |
| 41xx | G41xx0 | | 0,80-1,10 | 0,15-0,25 | |
| 43xx | G43xx0 | 1,65-2,00 | 0,40-0,90 | 0,20-0,30 | |
| 46xx | G46xx0 | 0,70-2,00 | | 0,15-0,30 | |
| 48xx | G48xx0 | 3,25-3,75 | | 0,20-0,30 | |
| 51xx | G51xx0 | | 0,70-1,10 | | |
| 61xx | G61xx0 | | 0,50-1,10 | | 0,10-0,15V |
| 86xx | G86xx0 | 0,40-0,70 | 0,40-0,60 | 0,15-0,25 | |
| 92xx | G92xx0 | | | | 1,80-2,20Si |

^aA concentração de carbono, em porcentagem em peso vezes 100, é inserida em lugar de "xx" para cada aço específico.

^bExceto para as ligas 13xx, a concentração de manganês é inferior a 1,00%p.

Exceto para as ligas 12xx, a concentração de fósforo é inferior a 0,35%p.

Exceto para as ligas 11xx e 12xx, a concentração de enxofre é inferior a 0,04%p.

Exceto para as ligas 92xx, a concentração de silício varia entre 0,15 e 0,35%p.

Fonte: CALLISTER, 2002

Além dessas classificações, existe também a classificação de aços de baixa liga e alta liga. Os aços de baixa liga são materiais que possuem uma quantidade abaixo de 5% em peso de elementos de liga em sua estrutura. Aços de alta liga ou aço inoxidável são materiais que possuem uma quantidade acima de 5% em peso de elementos de liga, podendo esses ser cromo, níquel, molibdênio, entre outros; a presença desses elementos conferem aos aços de alta liga uma alta resistência à corrosão, resistência à oxidação, resistência à ácidos e bases, entre outras propriedades (CALLISTER, 2002).

2.4 Tratamento Térmico

O tratamento térmico refere-se a um processo controlado de aquecimento e resfriamento que é aplicado a um certo material metálico com a intenção de controlar as microestruturas que

irão se formar através desse processo, dando assim a possibilidade de controlar as propriedades mecânicas do material.

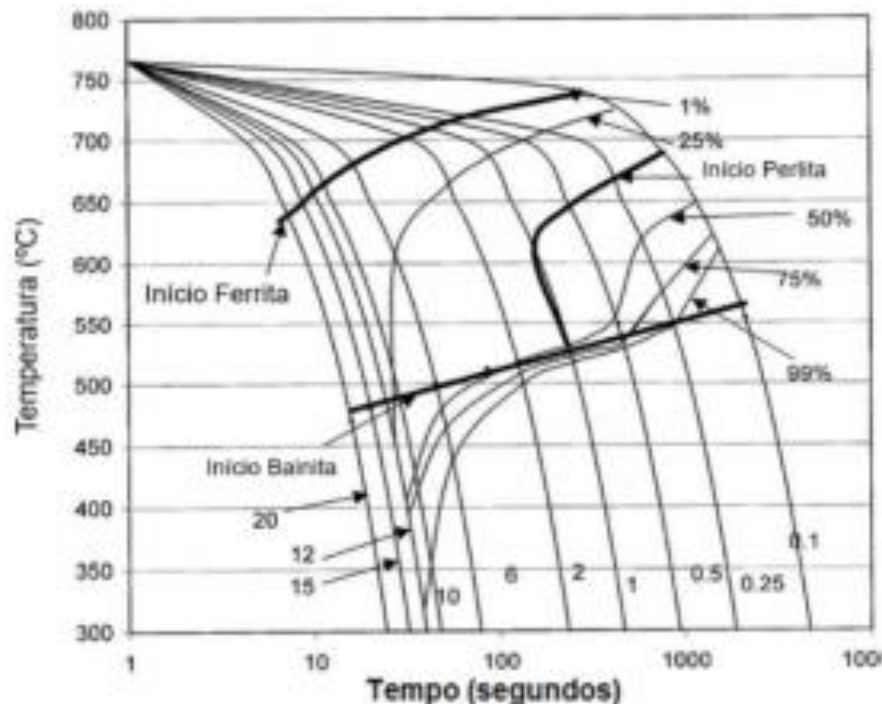
O processo se desenvolve com o aquecimento do material a uma temperatura específica (determinada pelo diagrama ferro carbono, figura 1), na qual toda a microestrutura do aço se transforma em austenita, após o que o material é mantido nessa temperatura por um certo período de tempo. Na sequência ele é submetido a um resfriamento controlado a taxa adequada. Utilizando as curvas de resfriamento, é possível controlar, dessa forma, as microestruturas desejadas para atingir as propriedades mecânicas requeridas (PORTER, EASTERLING e SHERIF, 2009)

Existem diversos tipos de tratamentos térmicos, mas o presente trabalho teve como foco os tratamentos de têmpera e revenimento.

- Têmpera (*Quenching*): Consiste em resfriar rapidamente o material aquecido, geralmente o mergulhando em algum meio com temperatura mais baixa, como água, óleo, salmoura ou ar. Esse tratamento visa obter a microestrutura martensita, que é mais dura e resistente, aumentando assim a resistência mecânica do material e, consequentemente, a dureza.
- Revenimento (*tempering*): Após a têmpera, o material é aquecido novamente a uma temperatura moderada (mais baixa que a têmpera) e se mantém nessa temperatura por um determinado tempo. Esse tratamento visa reduzir a fragilidade obtida com a martensita, melhorando assim sua tenacidade e ductilidade.

Utilizando o diagrama Fe-Fe₃C, algumas informações termodinâmicas podem ser obtidas, como a temperatura de austenitização de um aço, de acordo com o teor de carbono presente em sua composição química. Vale ressaltar que o diagrama Fe-C é apenas um ponto de partida, pois só é válido para resfriamento lento. Para tratamentos térmicos com maiores velocidades de resfriamento, utilizamos as curvas TTT (transformação – tempo – temperatura), para tratamentos térmicos isotérmicos, com transformação de fase em temperatura constante, e as curvas TRC (Transformação em Resfriamento Contínuo), para tratamentos nos quais as transformações de fase ocorrem durante o resfriamento, conforme mostra a figura 2.

Figura 2 – Diagrama TRC para o aço 4140



Fonte: Adaptado de Jayprakash Chipalkatti, 1999.

2.5 Martensita

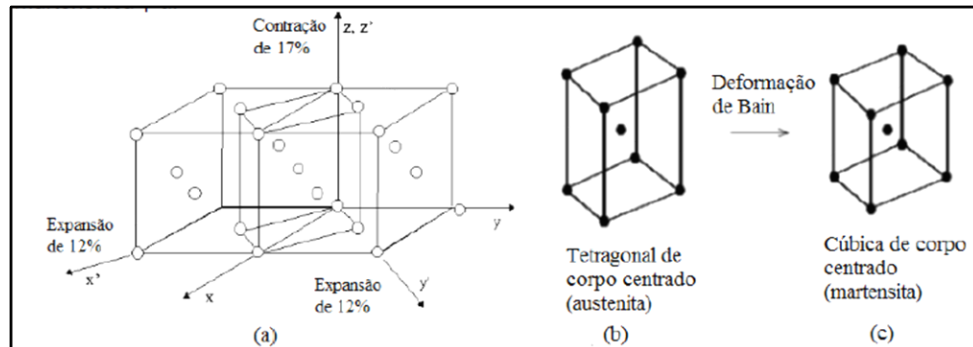
A martensita é uma estrutura cristalina metaestável que é formada durante o tratamento térmico de têmpera de alguns aços (CALLISTER, 2002). A martensita é caracterizada por uma estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC) deformada. A estrutura tetragonal é formada ainda na austenitização, com a solubilização do carbono que ocupa os interstícios octaédricos por uma questão de energia (simetria), chamado de *Zener Ordering* e acaba alongado o eixo “z”, dando a forma tetragonal. Essa forma, no resfriamento sofre as deformações, como previsto pela teoria de Wechsler, Lieberman e Read (MARCOMINI, 2008):

- Uma distorção de Bain transformando a estrutura CFC em TCC com todos os planos sendo deformados-compressão de c (z) e expansão dos eixos ‘a’;
- Uma deformação por cisalhamento que mantém a estrutura do cristal (escorregamento ou maclagem);
- As deformações anteriores ocorrendo simultaneamente dão origem a um plano distorcido, porém os planos não distorcidos da fase austenítica e da fase martensítica ainda apresentam orientações diferentes;

- d) Uma rotação do reticulado que permite que os planos não distorcidos fiquem com a mesma orientação, permitindo a coerência entre matriz e martensita.

A figura 3 apresenta um esquema da deformação de Bain

Figura 3 - Esquema da deformação e Bain na formação da estrutura da Martensita



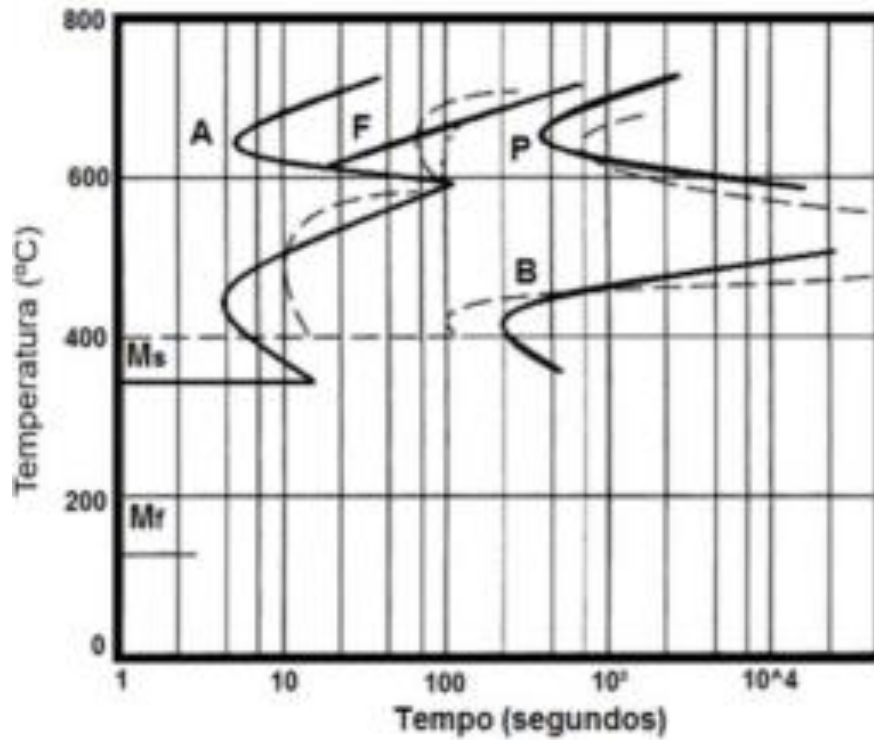
Fonte: Tese de doutorado: Karl Zilnyk, 2015

A principal característica da martensita é sua alta dureza e, consequentemente, fragilidade. Essa alta dureza advém da alta concentração de carbono que fica retida na estrutura TCC. A martensita apresenta também uma estrutura finamente laminada, também nomeada de estrutura em agulhas ou placas.

Aços temperados e revenidos são muito utilizados em aplicações que exigem alta resistência mecânica, como: autopeças, máquinas-ferramenta, ferramentas de cortes, molas e outros, como já mencionado anteriormente. Porém, como essa microestrutura possui dureza elevada, tornando-a uma estrutura frágil, a martensita é mais suscetível a trincas, principalmente, em situações extremas (altas tensões), que pode ser agravada em temperaturas baixas.

A figura 4 mostra o diagrama de transformação por resfriamento contínuo para o aço SAE 4140, evidenciando qual a taxa de resfriamento necessário para atingir a martensita durante o resfriamento da têmpera.

Figura 4 – Diagrama de transformação por resfriamento contínuo para aço-liga (tipo 4140)



Fonte: TESTMAT, 2013

Legenda: A (austenita), F (ferrita), P (perlita), B (bainita), Ms (início da formação de martensita), Mf (fim da formação de martensita)

A martensita nucleia e cresce dentro dos grãos austeníticos prévios, portanto, o limite para o pacote de ripas ou de placas de martensita são os contornos de grãos austeníticos de origem, conforme a figura 5.

Figura 5 – Formação da martensita em relação aos grãos austeníticos

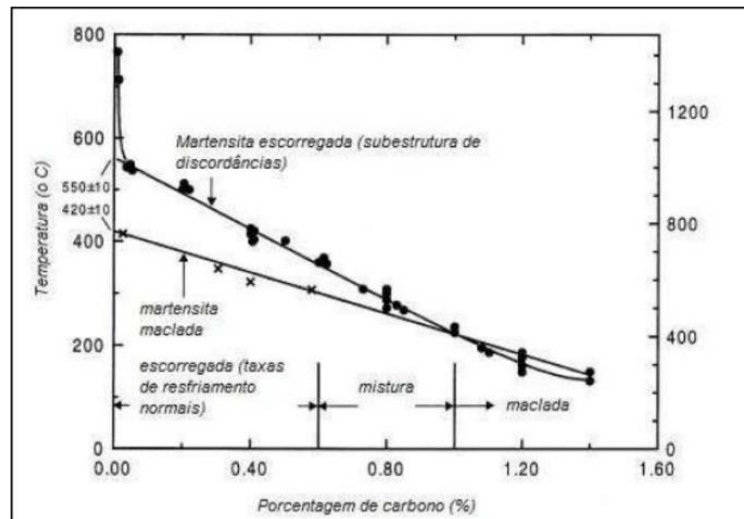


Fonte: **J. R. C. Guimarães • P. R. Rios**

J Mater Sci (2009) 44:998–1005

Dependendo do teor de carbono, a martensita pode se apresentar em ripas ou placas, conforme a figura 6.

Figura 6 - Formas da martensita, de acordo com o teor de carbono.



Fonte: HONEYCOMBE e BHADSHIA, 1996

2.6 Inclusão

Segundo o autor William D. Callister Jr., inclusão (em relação aos materiais metálicos) refere-se a partículas ou impurezas presentes no material, que normalmente são de natureza não metálica. Essas impurezas podem afetar as propriedades mecânicas e o desempenho do aço sob carga.

A importância de saber se um material contém inclusões indesejadas ou não, decorre do fato que se não for controlada elas poderão agir como concentradores de tensão no meio do material, diminuindo assim a resistência mecânica do aço e, conseqüentemente, deixando o material mais propenso a fraturar. Os principais efeitos negativos causados pelas inclusões são:

- Redução da ductilidade
- Diminuição da tenacidade
- Influência na resistência à fadiga

O controle das inclusões é uma preocupação durante o processo de fabricação de aços de alta qualidade. Para realizar o controle são utilizados diversos métodos, como por exemplo refinação de escórias e adição de agentes desoxidantes, como alumínio e silício (ELY, 2017). Os principais métodos de controle são:

- Refino de escórias: durante o processo de fabricação, é possível utilizar esse método para reduzir o número e o tamanho das inclusões.
- Adição de agentes desoxidantes: a adição controlada de agentes desoxidantes ajuda a reduzir as inclusões nos aços; esses elementos reagem com as impurezas do metal líquido, formando compostos estáveis que são retirados, posteriormente, durante o refino.
- Controle do processo de solidificação: os controles dos parâmetros de solidificação, como a taxa de resfriamento, contribuem para a reduzir a formação de inclusões prejudiciais, formando assim inclusões mais finas e menos nocivas para as propriedades mecânicas do aço.

Utilizando-se desses métodos para controle das inclusões e impurezas, é possível obter uma distribuição controlada e reduzida desses elementos na estrutura do aço, podendo melhorar assim as propriedades mecânicas do aço e a sua usinabilidade.

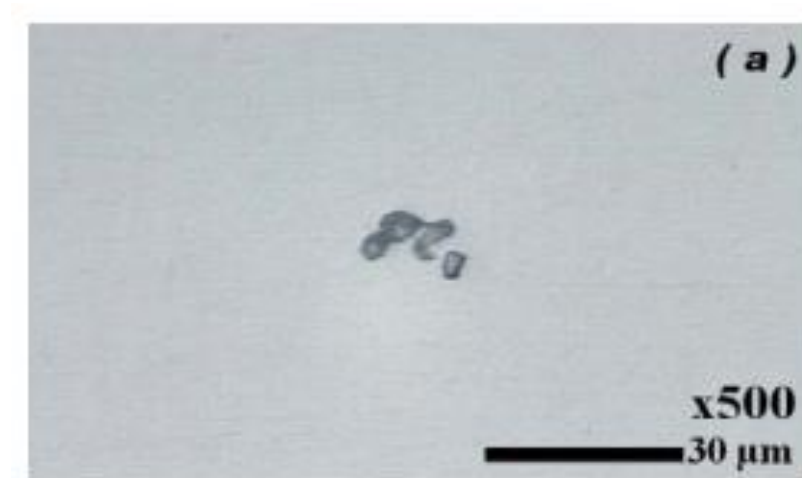
A figura 7 exemplifica a observação de inclusões no microscópio óptico, seguindo a norma ASTM E 45, e a tabela 3 mostra a composição química do aço utilizado para a análise

Tabela 3 - Composição química do aço baixo carbono acalmado ao alumínio

| TIPO DE AÇO | COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO AÇO (%) | | | | | | |
|-------------|--------------------------------------|------|-------------------|------|-------------------|-------|--------|
| | C | Mn | P _{máx.} | Si | S _{máx.} | Al | N |
| B.C. | 0,045 | 0,27 | 0,018 | 0,01 | 0,012 | 0,055 | 0,0005 |

Fonte: Rubens Faco, 2005

Figura 7 – Inclusão de óxido de alumina globular em um aço baixo carbono acalmado ao alumínio



Fonte: Rubens Faco, 2005

2.7 Fragilização da Martensita Revenida

O fenômeno da fragilização da martensita revenida é caracterizada por uma queda na tenacidade à fratura e ao impacto do material, podendo ser evidenciado pelo ensaio de impacto

Charpy e através do KIc (tenacidade à fratura). A fragilização da Martensita Revenida normalmente ocorre entre as temperaturas de 250°C a 370° C (BROOKS, 1996), podendo inclusive ser agravada se houver a presença de inclusões no meio da estrutura do aço, como por exemplo fósforo e estanho.

Horn e Ritchie, autores do artigo “*Mechanisms of Tempered Martensite Embrittlement in Low Alloy Steels*” realizaram um estudo profundo das possíveis causas desse fenômeno da FMR; eles utilizaram dois aços durante o estudo: um aço 4340 padrão e um 4340 modificado com silício (300-M). Através desse estudo, foi possível concluir que (HORN e RITCHIE, 1978):

- Em aços que possuem grandes quantidades de austenita retida, os carbonetos precipitam sobre a austenita retida nos contornos das ripas de martensita, levando a uma fratura por clivagem entre essas ripas na estrutura (sendo esse o caso mais severo do fenômeno FMR)
- Em aços com altos níveis de impureza, os carbonetos e as inclusões presentes nos contornos de grãos austeníticos promovem a fratura intergranular.
- Em aços com baixo teor de austenita retida e inclusões, o micromecanismo de fratura se dá pela clivagem transgranular

Figura 8 - Composição dos aços usados por Horn e Ritchie

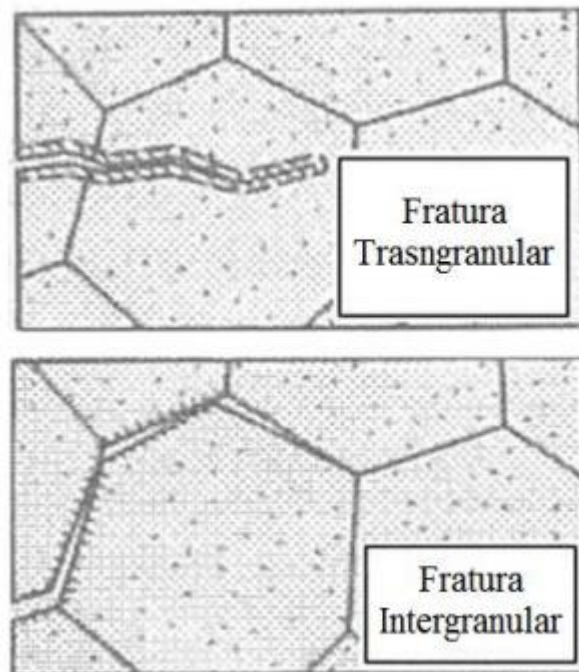
EXPERIMENTAL PROCEDURES

The materials investigated were two commercial ultra-high strength steels, AISI 4340 and 300-M, of composition in weight percentages shown below:

| | C | Mn | Cr | Ni | Mo | Si | S | P | V | Cu |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 4340 | 0.41 | 0.80 | 0.79 | 1.75 | 0.23 | 0.26 | 0.004 | 0.006 | — | 0.06 |
| 300-M | 0.42 | 0.76 | 0.76 | 1.76 | 0.41 | 1.59 | 0.002 | 0.007 | 0.10 | — |

Fonte: HORN, R. M; RITCHIE, R, 1978

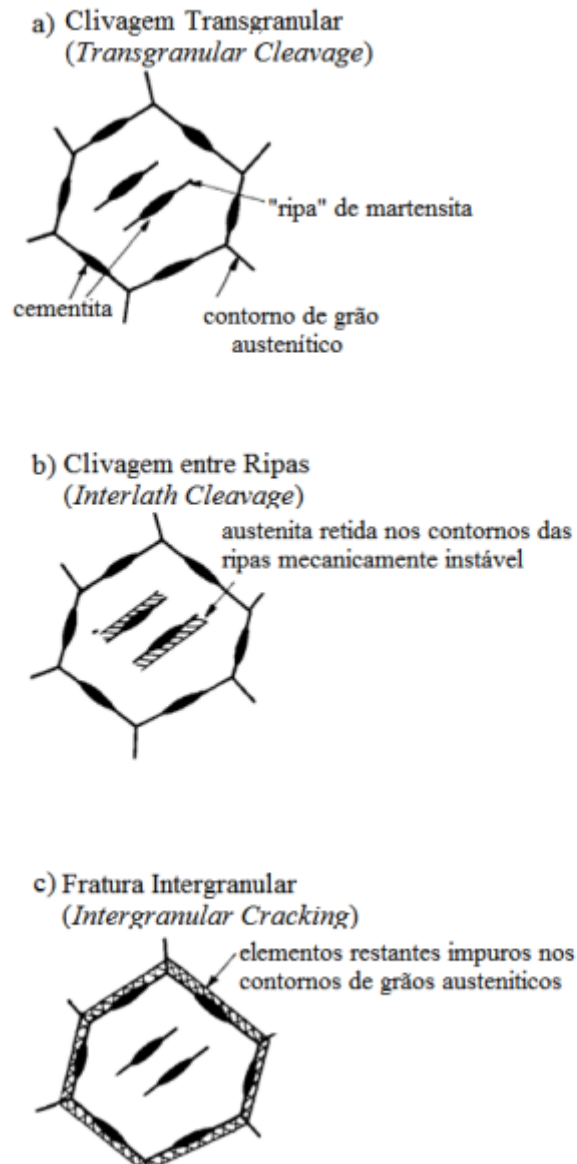
Figura 9 - Mecanismos de fratura



Fonte: CANALE, L. C. F; MESQUITA, R A; TOTTEN, G. E., 2008 - adaptado

Entretanto, o resultado mais importante desse estudo de Horn e Ritchie, foi a caracterização do principal mecanismo de fragilização da martensita revenida. Eles constataram que a FMR ocorre por causa da decomposição térmica da austenita retida em filmes de cementita intra ou inter-ripas de martensita, podendo ainda ser agravada pela presença de impurezas nos contornos de grãos austeníticos; para o caso de uma combinação com as impurezas, o micromecanismo de fratura seria misto: intergranular e alveolar. Esse resultado foi corroborado em uma tese de mestrado e uma de doutorado de José Benedito Marcomini, no qual ele obtém o mesmo resultado na fragilização no aço comercial SAE52100 e um SAE 5160H, sendo que este último apresentou FMR na mesma faixa de temperatura que os estudiosos Horn and Ritchie.

Figura 10 - Mecanismos de Fratura Obtidos por Horn e Ritchie



Fonte: HORN, R. M; RITCHIE, R, 1978

Outro resultado importante obtido do estudo, foi que o aço 300-M apresentou a faixa de temperatura da FMR em uma temperatura mais elevada (450°C), que também foi observado na tese de doutorado de Marcomini, que em um de seus materiais testados, possuía um aço com silício presente em sua estrutura. Marcomini constatou que a nova liga testada (Fe-C-Mn-Si-Cr) não apresentou FMR mesmo quando revenido a 450°C, chegando à conclusão de que o Si eleva a temperatura de decomposição térmica da austenita, o que inibe o mecanismo de fragilização observado por Horn e Ritchie.

2.8 Estágios de Revenimento

Durante o processo de revenimento, podem ocorrer algumas transformações durante o aquecimento de alguns materiais metálicos (HONEYCOMBE e BHADSHIA 1996). Os estágios da revenimento podem ser divididos em 4 etapas principais. (PORTER, EASTERLING e SHERIF, 2009).

- Precipitação de carbonetos de transição, entre 100°C e 200°C (primeiro estágio de revenimento).
- Transformação da austenita retida para ferrita e cementita, entre 200°C e 350°C (segundo estágio).
- Precipitação de ripas de cementita, entre 250°C e 350°C (terceiro estágio).
- Formação de ligas de carboneto, entre 500°C e 700°C (quarto estágio ou endurecimento secundário).

Além desses quatro estágios principais de revenimento, há alguns outros, sub-estágios entre eles, como mostra a tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Estágios de Revenimento

| Temperature/°C | Transformation | Remarks |
|----------------|---|--|
| 25–100 | Carbon segregation to dislocations and boundaries; pre-precipitation clustering and ordering | Clustering predominant in high-carbon steels |
| 100–200 | Transition-carbide precipitation, diam. 2 nm (first stage of tempering) | Carbides may be η (Fe_2C) or ϵ (Fe_{2-4}C) |
| 200–350 | Retained austenite transforms to ferrite and cementite (second stage) | Associated with tempered martensite embrittlement |
| 250–350 | Lath-like Fe_3C precipitation (third stage) | |
| 350–550 | Segregation of impurity and alloying elements | Responsible for temper embrittlement |
| 400–600 | Recovery of dislocation substructure. Lath-like Fe_3C agglomerates to form spheroidal Fe_3C | Lath structure maintained |
| 500–700 | Formation of alloy carbides, (secondary hardening or fourth stage) | Occurs only in steels containing Ti, Cr, Mo, V, Nb, or W; Fe_3C may dissolve |
| 600–700 | Recrystallization and grain growth; coarsening of spheroidal Fe_3C | Recrystallization inhibited in medium-carbon and high-carbon steels; equiaxed ferrite formed |

Fonte: (PORTER, EASTERLING e SHERIF, 2009)

Analisando a tabela, observa-se que as transformações da estrutura do aço durante o revenimento variam conforme a composição química do aço, podendo essa transformação ocorrer com mais intensidade, menos intensidade ou até mesmo não acontecer.

2.8.1 Segregação de carbono

A presença dos átomos de carbono na estrutura martensítica causa uma distorção considerável, resultando em uma interação energética entre o carbono e as regiões de deformação que se formam ao redor das discordâncias (afetando negativamente a tenacidade a fratura do material). Em ripas de martensita, o carbono tende a se difundir em locais próximos às discordâncias, de modo a tentar reduzir seu potencial químico; já as placas de martensita, ocorre a formação de aglomerados (ou zonas ricas) de carbono, pois sua estrutura interna possui uma quantidade relativamente baixa de discordâncias.

Durante o processo de resfriamento no revenimento, há um período para que o carbono presente na estrutura se segregue (por difusão) ou se concentre em regiões específicas do material e até mesmo precipite-se nas formas de carbonetos ou cementita, dependendo da composição química do material. Influenciando desse modo as propriedades mecânicas do material. A Tabela 5 a seguir mostra a sequência de precipitação do carbono em relação à composição química aço.

Tabela 5 – Sequência de precipitação dos carbonetos

Carbide Precipitation Sequences

| Alloy (wt%) | Precipitation Sequence |
|----------------|---|
| Fe-C | ϵ -carbide* \rightarrow Fe_3C (\rightarrow graphite) |
| Fe-2 V-0.2 C | $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{VC}$ or V_4C_3 |
| Fe-4 Mo-0.2 C | $\text{FeC} \rightarrow \text{Mo}_2\text{C} \rightarrow \text{M}_6\text{C}^\dagger$ |
| Fe-6 W-0.2 C | $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{W}_2\text{C} \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6 \rightarrow \text{M}_6\text{C}$ |
| Fe-12 Cr-0.2 C | $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{Cr}_{23}\text{C}_6$ |

* Does not form when $\text{C} < 0.2\%$.

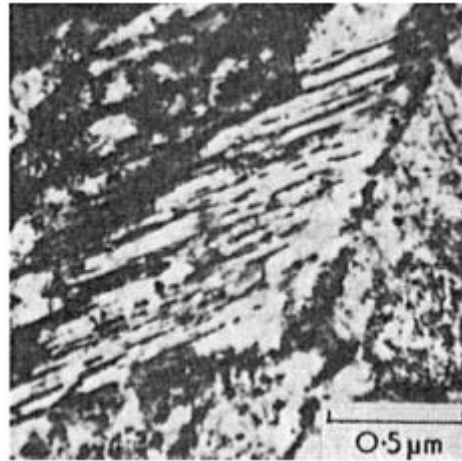
† M stands for a mixture of the substitutional alloying elements, in this case Fe and Mo.

Fonte: (PORTER, EASTERLING e SHERIF, 2009)

2.8.2 Cementita

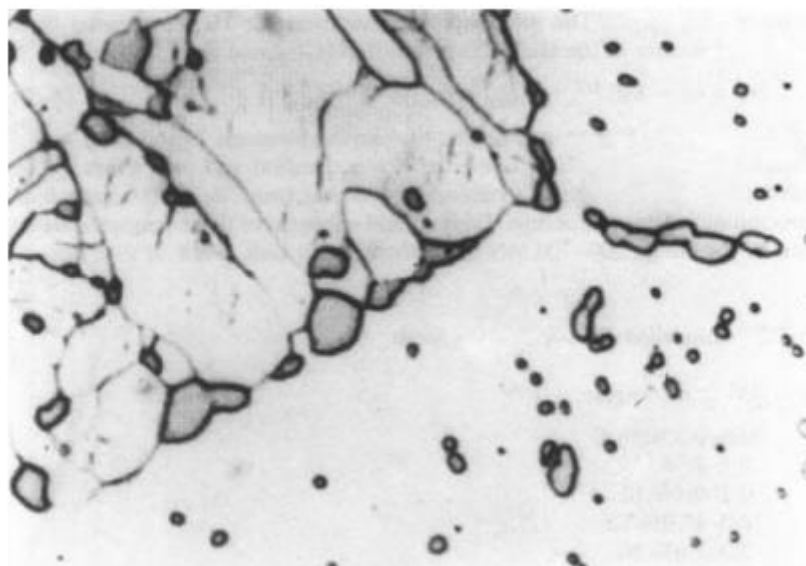
A cementita é formada, na maioria dos aços, durante o revenimento entre temperaturas de 250°C e 700°C. Inicialmente, a cementita precipita na forma de ripas (conforme mostra a figura 6), possuindo uma estrutura cristalina ortorrômbica, porém em altas temperaturas, a cementita rapidamente se transforma e assume uma forma esferoidal (figura 7), próxima aos 700°C. A sua composição é normalmente representada como $(\text{FeM})_3\text{C}$, no qual M é um elemento de liga que forma o carbeto (como explicado anteriormente).

Figura 6 – Ripas de Martensita no aço Fe-0.8C



Fonte: (HONEYCOMBE e BHADESHIA 1996).

Figura 7 – Cementita esferoidal no aço Fe-0.18C



Fonte: (PORTER, EASTERLING e SHERIF, 2009)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Composição química

A composição química do material utilizado é um aço SAE 4140, para ser utilizado neste trabalho. Tomemos como base a composição química padrão do aço SAE 4140, como mostrado anteriormente na Tabela 1.

3.2 Preparação dos Corpos de Prova para ensaio de impacto Charpy

Os corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy foram confeccionados de acordo com a norma ASTM E23 – 16b (2017), sendo o entalhe no formato de “V”. A figura 11 seguir ilustra o corpo de prova, bem como suas dimensões.

Figura 11 - Especificação da Norma ASTM E23 - 16b

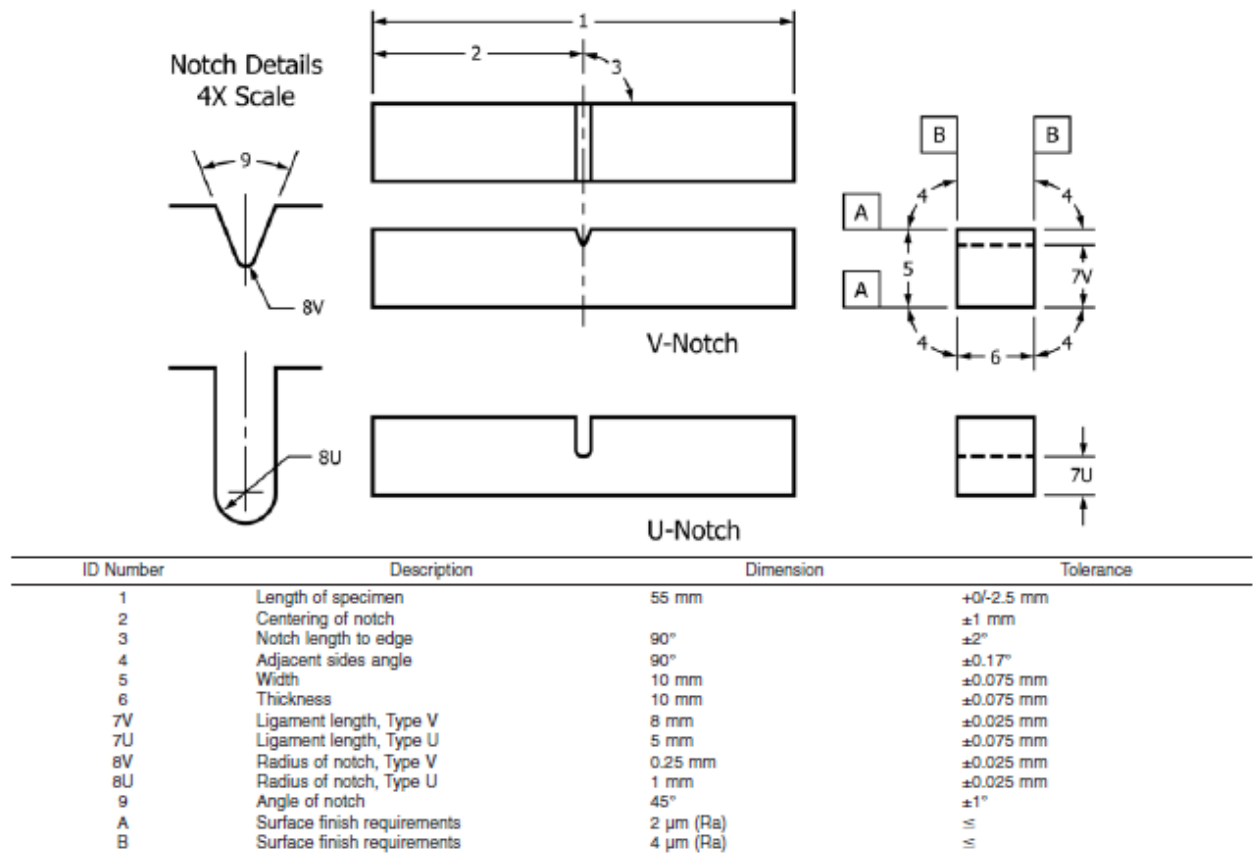


FIG. 1 Charpy (Simple-Beam) Impact Test Specimens, V-Notch and U-Notch

Figura 12 - Corpo de Prova



Fonte: Autor

Os furos nas pontas dos corpos de prova foram realizados para facilitar o manuseio das amostras durante o processo de tratamento térmico (figura 13).

Figura 13 - Corpos de Provas "Amarrados"



Fonte: Autor

3.3 Tratamento Térmico

Os corpos de prova passaram pelos processos de tratamento térmicos de têmpera, visando obter uma estrutura martensítica, e revenimento, a fim de determinar a faixa de temperatura da FMR. Para o tratamento térmico de têmpera, os corpos de prova foram aquecidos até 900°C e temperados em óleo em temperatura ambiente (23°C). Os detalhes do tratamento térmico de revenimento e demais informações estão dispostas na tabela 6 a seguir:

Tabela 6 - Detalhes do tratamento térmico

| Temperatura de autenitização (°C) | Temperatura de revenimento (°C) | Amostras |
|-----------------------------------|---------------------------------|----------|
| 900 | 200 | 1-4 |
| 900 | 300 | 5-8 |
| 900 | 370 | 9-12 |
| 900 | 450 | 13-16 |

Fonte: Autor

No revenimento, o corpo de prova foi aquecido até à temperatura indicada na tabela 6 e mantido nesta temperatura por aproximadamente 90 min. Após isso ele foi resfriado rapidamente em água.

Para o tratamento térmico das amostras, utilizou-se o forno mufla modelo FD3P-S do Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura da EESC – USP (figura 14)

Figura 14 - Forno de Tempera



Fonte: Autor

Para o processo de revenimento, foi utilizado o forno MUFLA modelo INTIFL-1300 do Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura da Escola de Engenharia de São Carlos (figura 15).

Figura 15 - Forno de Revenimento



Fonte: Autor

3.4 Metalografia

Foram realizadas as seguintes análises:

- Metalografia da peça bruta para verificar se o material estava condizente com a literatura (SAE 4140) – Sentido perpendicular
- Metalografia dos corpos de prova austenitizados em 900°C para averiguar a sua estrutura (se era martensítica ou não) e confirmar se os tratamentos térmicos haviam sido realizados corretamente – Direção paralela à direção de laminação (longitudinal)
- Metalografia da peça bruta para verificar inclusões – Direção paralela à direção de laminação (longitudinal) conforme norma ASTM E 45.

As amostras foram cortadas em uma serra (figura 16) disponível no departamento, pois a alta dureza impedia de utilizar o torno para cortá-las. A todo momento do corte, foi utilizado fluído de corte para refrigerar a peça e não causar mudança na estrutura. O Embutimento foi realizado utilizando baquelite preta.

Figura 16 - Serra



Fonte: Autor

Figura 17- Equipamento para embutimento



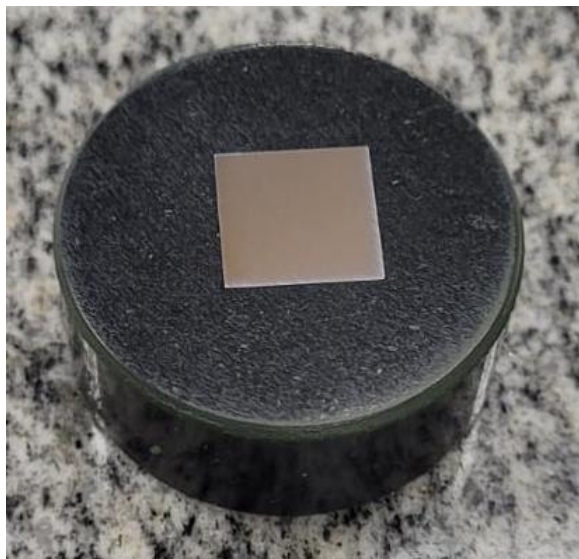
Fonte: Autor

Após o embutimento, as amostras foram lixadas na seguinte progressão de lixas

- 80
- 120
- 220
- 320
- 400
- 600
- 1000

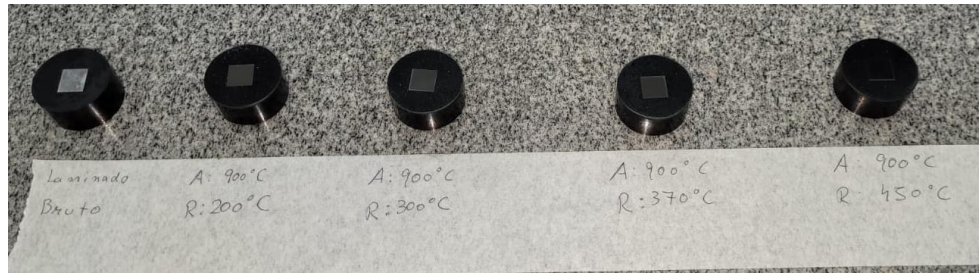
Após esse processo, as amostras foram polidas utilizando a politriz do Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura e utilizando óxido de cromo como abrasivo.

Figura 18 - Amostra laminado bruto na direção perpendicular



Fonte: Autor

Figura 19- Amostras Metalografia



Fonte: Autor

Após o polimento, atacou-se a superfície polida das amostras com Nital 3% durante 20 segundos, para revelar a estrutura do aço tratado; então a amostra foi levada ao microscópio (figura 20) do departamento de materiais e manufatura para observar as estruturas presentes.

Figura 20 - Foto do Microscópio



Fonte: Autor

3.5 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de Impacto Charpy foi realizado seguindo a norma ASTM E23 – 16b, visando obter os valores de energia absorvidas pelas amostras e assim observar em qual faixa de temperatura há a diminuição da energia absorvida, caracterizando assim a FMR.

Para Esse ensaio, foi utilizada a máquina da marca INSTRON WOLPERT PW30 com capacidade de 300 J de energia de impacto do departamento de materiais e manufatura da EESC. Após a obtenção dos resultados, obteve-se um gráfico das médias de energia absorvida em função das amostras.

Figura 21 - Equipamento para ensaio de impacto



Fonte: Autor

3.6 Ensaio de Dureza

A escala escolhida para realizar o ensaio de dureza foi a HRC (Rockwell C), pois já esperado durezas elevadas para o aço SAE 4140 tratado.

Foram tirados 5 valores de dureza da amostra que teve o valor mais significativo no ensaio de impacto, sendo que todas foram tiradas no sentido longitudinal das amostras. Podendo assim utilizar esses dados para montar um gráfico de dureza média em função das amostras.

Para realizar o ensaio de dureza, foi utilizado o equipamento da marca LECO, modelo RT – 240, do departamento de engenharia de materiais e manufatura, que tem um erro atrelado de 0,5%.

Figura 22 - Equipamento para ensaio de Dureza



Fonte: Autor

3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para realizar a análise da superfície de fratura dos corpos de prova do ensaio de impacto Charpy, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (figura 23) do Departamento de Engenharia de Materiais.

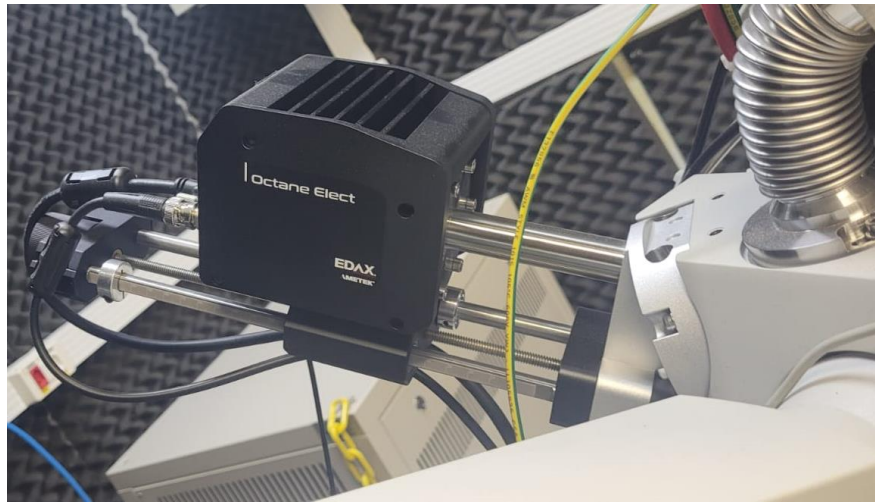
O microscópio utilizado é da marca INSPECT modelo F50; com dispositivo de Espectroscopia por energia dispersiva (EDS), esse equipamento é da marca EDAX modelo Octane Elect (figura 24).

Figura 23 - Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Autor

Figura 24 - Equipamento para EDS



Fonte: Autor

Os corpos de prova analisados foram o de maior energia absorvida revenido à 450°C e o de menor energia absorvida revenido à 300°C, de modo a observar qual mecanismo de fratura ocorreu em cada. Além disso, também se realizou o EDS de algumas inclusões que foram registradas durante o MEV.

Figura 25 - Superfície de fratura dos corpos de prova revenidos à 300°C (esquerda) e 450°C (direita)



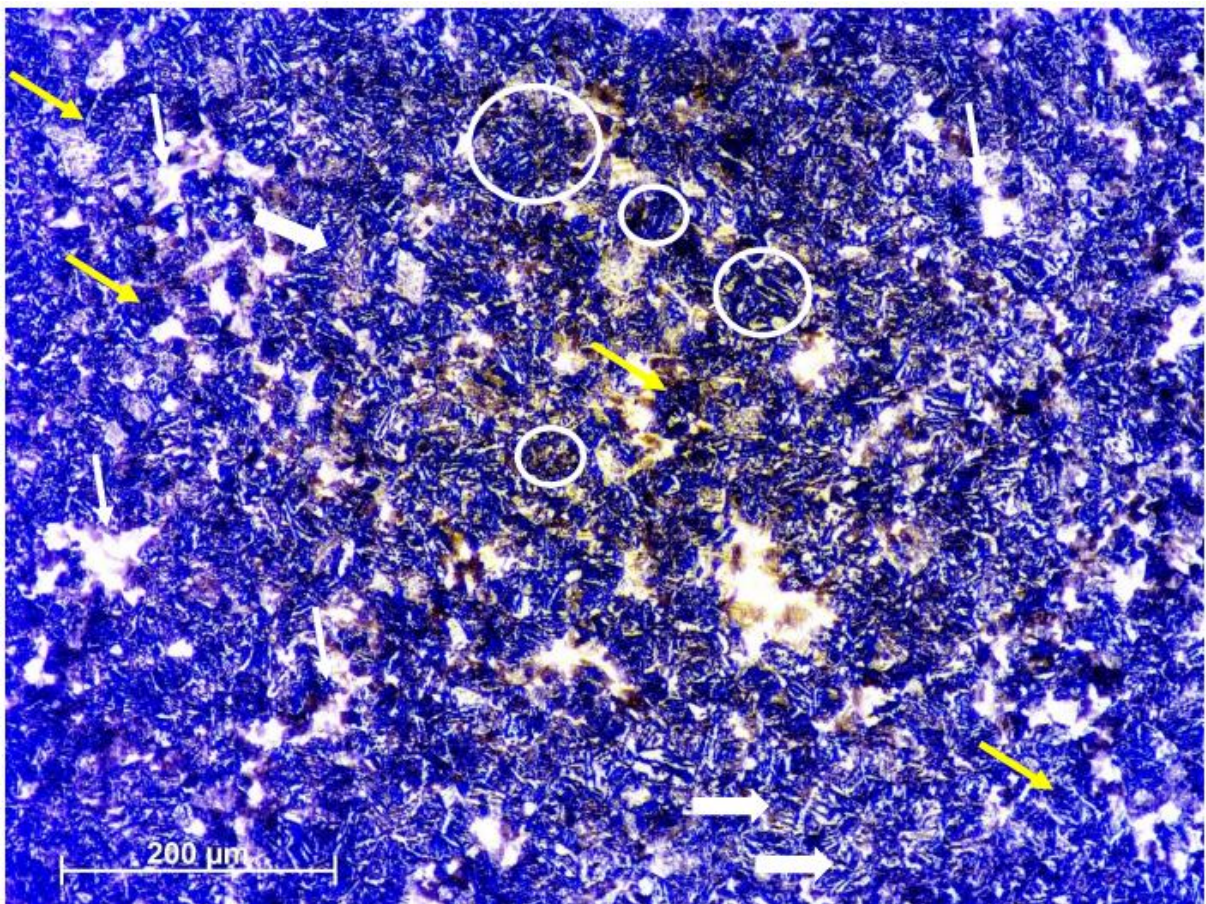
Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Metalografia da amostra laminada bruta na direção perpendicular

Após o ataque da superfície a ser observada, obteve-se a seguinte imagem:

Figura 26 - Metalografia da amostra bruta laminada, extraída na direção transversal à direção de laminação. Fases presentes: estruturas bainíticas, ferrita e perlita. Nital 2%. Aumento 10x.



Fonte: Autor

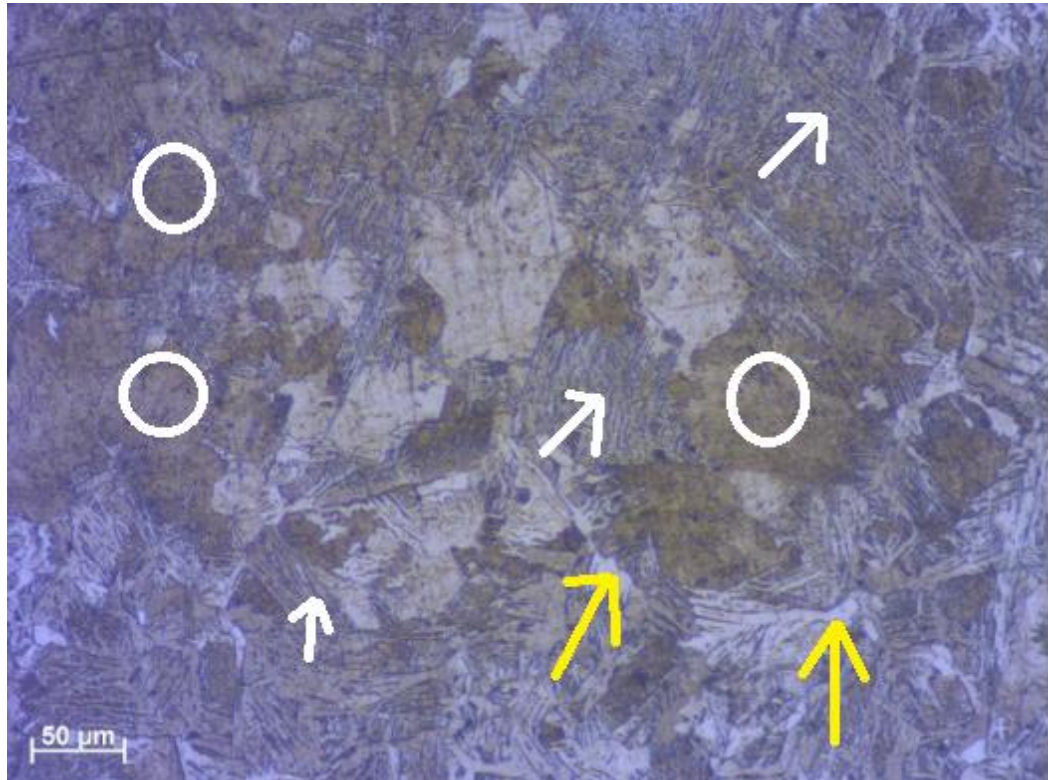
A figura 26 apresenta a microestrutura da amostra bruta laminada constituída de possíveis estruturas bainíticas (círculos brancos), ferrita (setas brancas) e perlita (setas amarelas mais finas). A estrutura observada é coerente com o esperado para o aço 4140 laminado a

quente. Devido à presença de elementos de liga e o teor de carbono (0,38 – 0,43 – NBR NM87) em sua composição, dependendo da temperatura ambiente quando da campanha de laminação, é possível a ocorrência de estruturas típicas de resfriamento mais rápido, fora do equilíbrio, como bainita e até martensita.

4.2 Metalografia das amostras tratadas

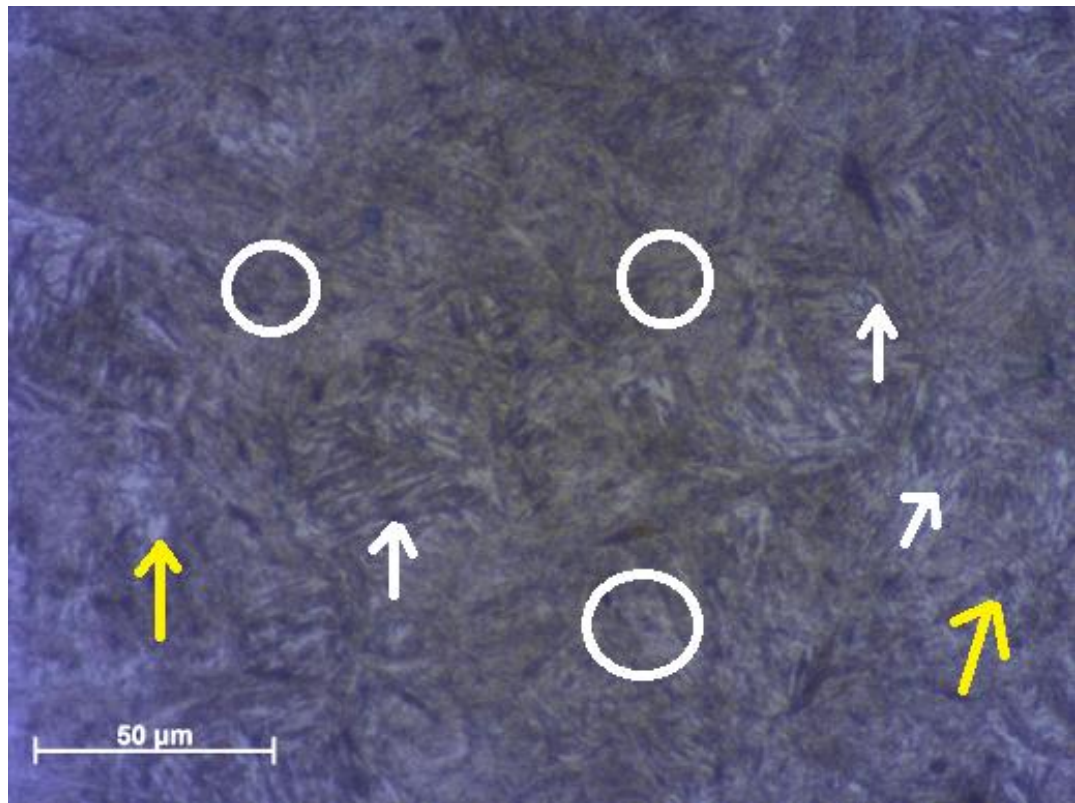
Foram realizadas análises microestruturais em microscópio óptico dos corpos de prova de impacto, temperados e revenidos que são apresentados nas figuras de 27 a 30.

Figura 27- Corpo de prova autenitizado em 900°C e revenido a 200°C. Fases presentes: Martensita, austenita retida, bainita. Nital 2%. Aumento 20X



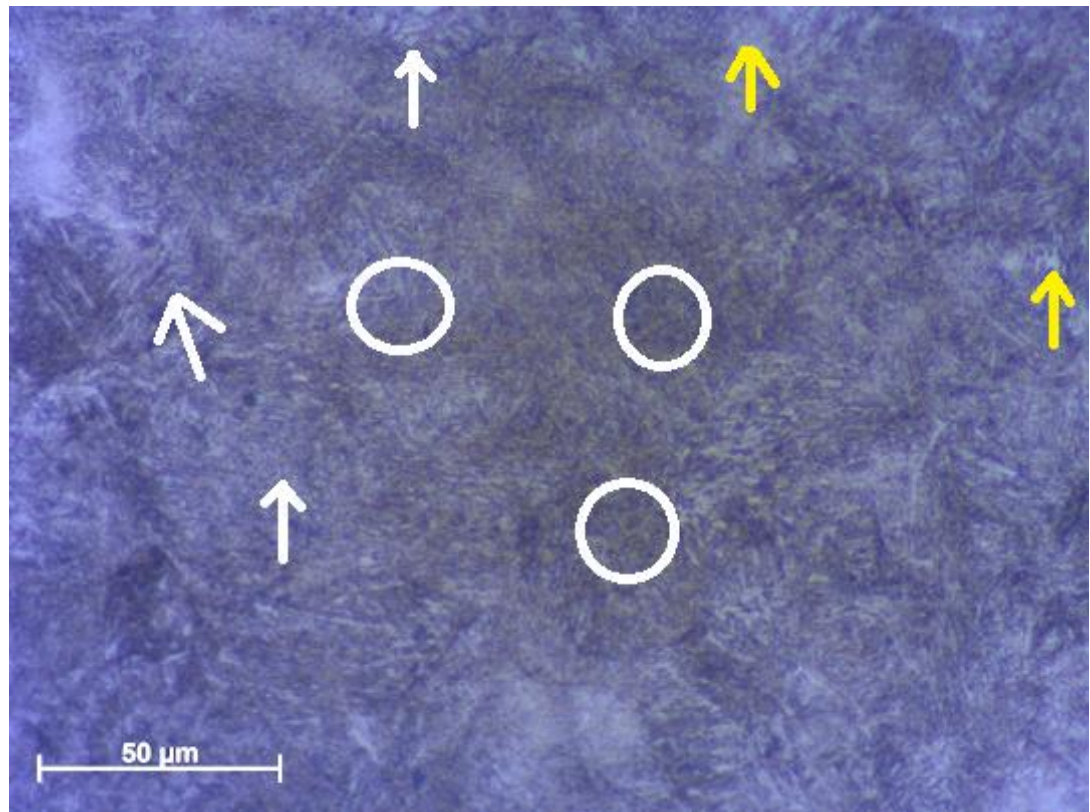
Fonte: Autor

Figura 28 – Corpo de prova autenitizado em 900°C e revenido a 300°C. Fases presentes: Martensita, austenita retida, bainita. Nital 2%. Aumento 50X



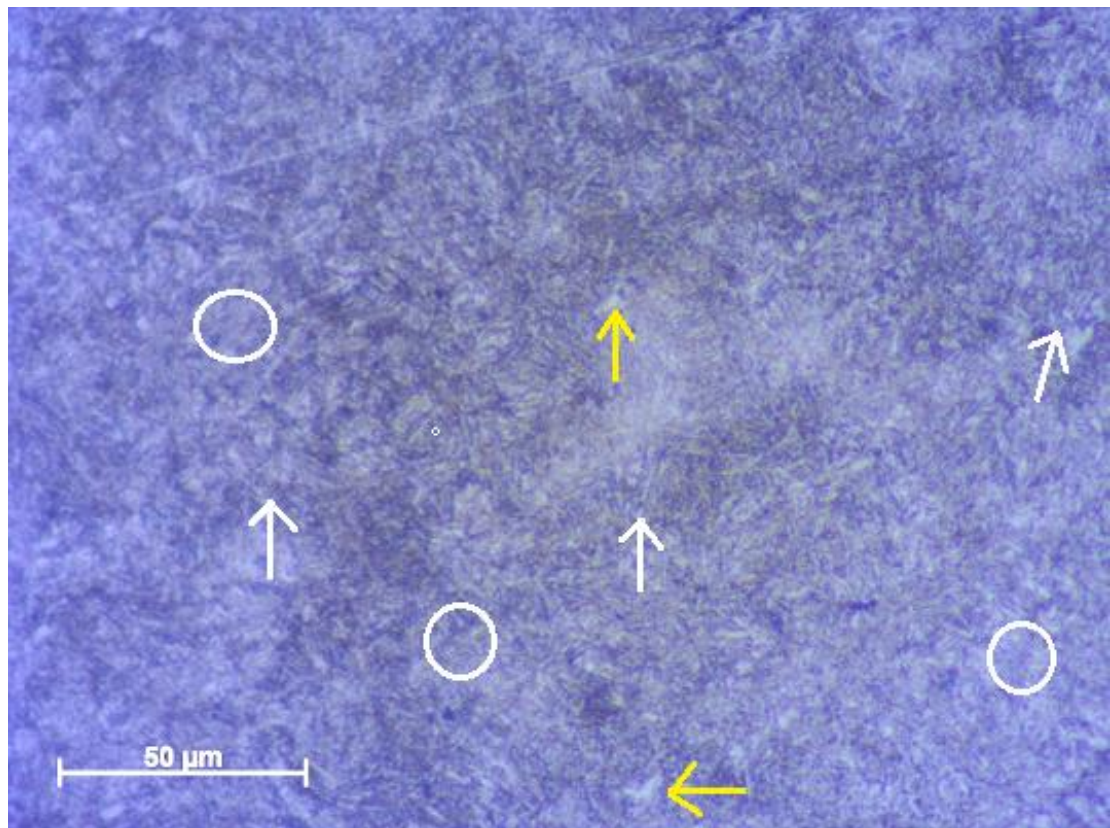
Fonte: Autor

Figura 29- Corpo de prova autenitizado em 900°C e revenido a 370°C. Fases presentes: Martensita, austenita retida, bainita. Nital 2%. Aumento 50X



Fonte: Autor

Figura 30- Corpo de prova autenitizado em 900°C e revenido a 450°C. Fases presentes: Martensita, austenita retida, bainita. Nital 2%. Aumento 50X



Fonte: Autor

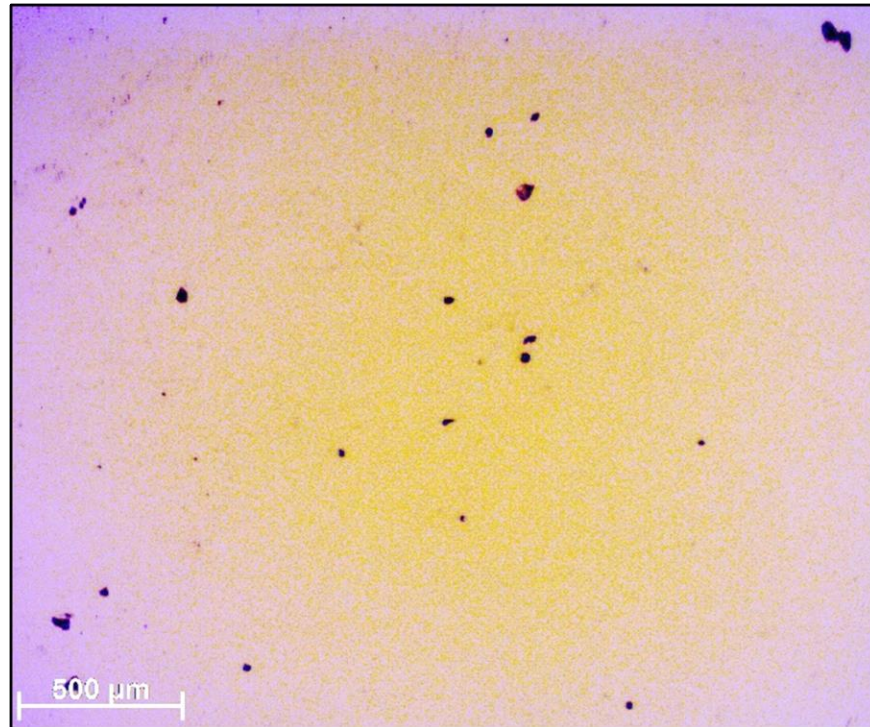
Analisando as imagens, nota-se que a estrutura das 4 amostras é predominantemente martensítica (indicado pelos círculos brancos); as partes brancas no fundo da matriz seria austenita retida (indicada pelas setas amarelas). Além disso, observa-se bainita, setas brancas, (principalmente na figura 27) que é a estrutura mais escura com veios de ferrita no meio, ao lado das placas de martensita.

Nota-se também que há um refino na malha a cada aumento da temperatura de revenimento, observado através da diminuição da austenita retida na estrutura (setas amarelas) nas figuras 27 a 30, corroborando assim que os tratamentos térmicos foram realizados de forma adequada, sendo possível assim seguir com a caracterização do fenômeno da FMR.

4.3 Metalografia da amostra laminado bruto longitudinal

Utilizando o microscópio do Departamento de Engenharia de Materiais, obteve-se a seguinte imagem:

Figura 31 – Inclusões (Aumento 100x)



Fonte: Autor

Os resultados da análise de inclusões não metálicas, conforme a norma ASTM E 45, encontra-se na tabela 4

Tabela 7 - Resultados da análise de inclusões, conforme ASTM E 45

| A | | B | | C | | D | |
|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| FINA | GROSSA | FINA | GROSSA | FINA | GROSSA | FINA | GROSSA |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

Legenda: A-Sulfetos, B-Alumina, C-Silicatos, D-Óxidos globulares.

4.4 Resultados do Ensaio de Impacto Charpy

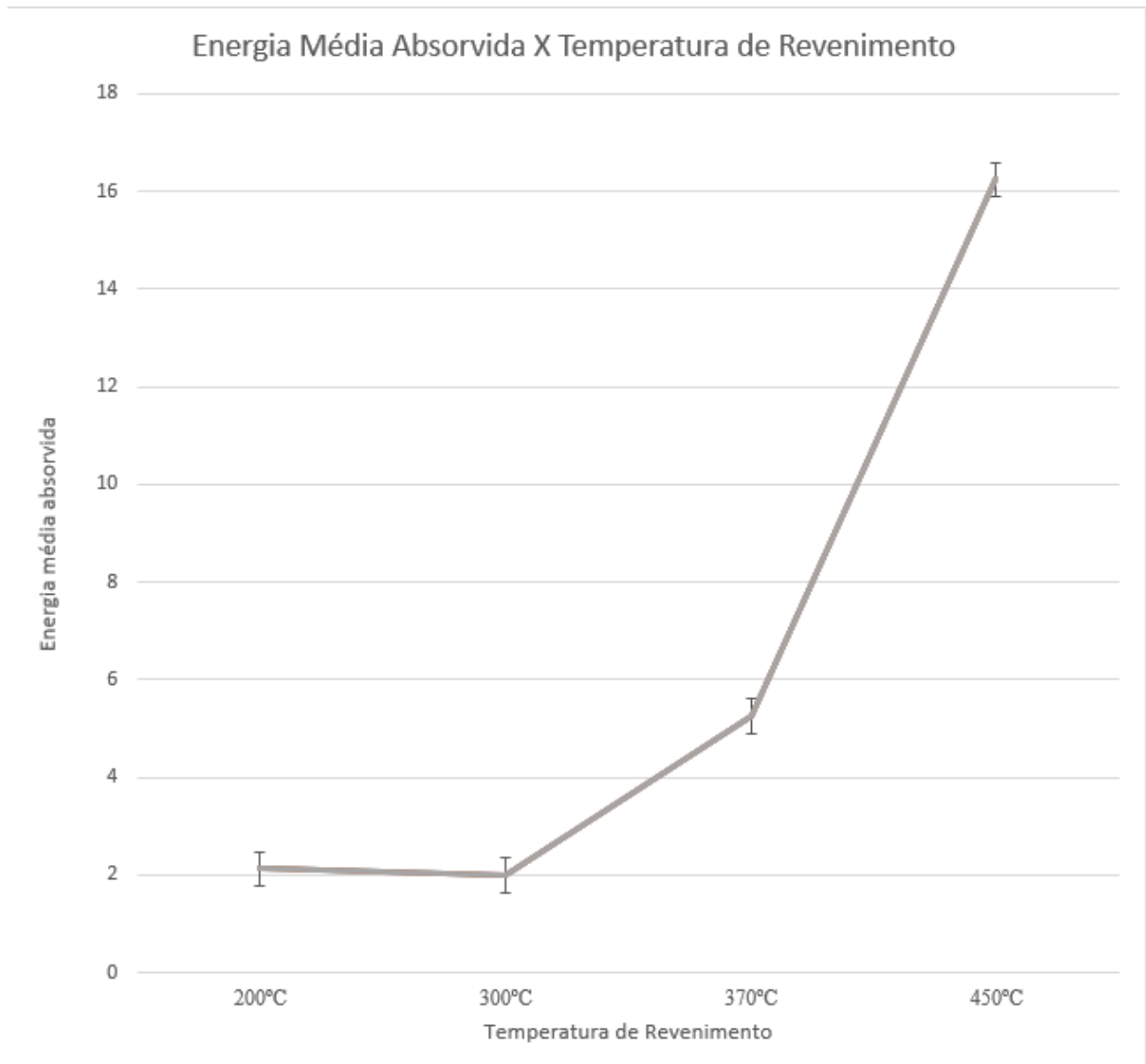
Após realizado o ensaio de impacto charpy, os resultados foram organizados em uma planilha (tabela 8) de modo que facilitasse a visualização e o desenvolvimento de um gráfico de Energia média Absorvida X Condição de Revenimento com desvio padrão das medidas realizadas.

Tabela 8 - Resultados - Ensaio de Impacto

| Condição de Revenimento | Amostras | Ensaio de Impacto (J) | Desvio Padrão (J) | Energia de Impacto média (J) |
|-------------------------|------------|-------------------------|-------------------|------------------------------|
| 900 A 200 R | Amostra 1 | 2,0 | 0,35 | 2,125 |
| | Amostra 2 | 2,0 | | |
| | Amostra 3 | 2,0 | | |
| | Amostra 4 | 2,5 | | |
| 900 A 300 R | Amostra 5 | 2,5 | 0,35 | 2 |
| | Amostra 6 | 2,0 | | |
| | Amostra 7 | 1,5 | | |
| | Amostra 8 | 2,0 | | |
| 900 A 370 R | Amostra 9 | 8,0 | 0,35 | 5,3 |
| | Amostra 10 | 4,0 | | |
| | Amostra 11 | 4,0 | | |
| | Amostra 12 | 5,0 | | |
| 900 A 450 R | Amostra 13 | 8,0 | 0,35 | 16,25 |
| | Amostra 14 | 12,0 | | |
| | Amostra 15 | 12,0 | | |
| | Amostra 16 | 33,0 | | |

Fonte: Autor

Figura 32 - Energia de Impacto médio X condição de revenimento



Fonte: Autor

Analisando os resultados obtidos, conseguimos observar uma leve queda no gráfico gerado na temperatura de revenimento à 300°C, indicando que provavelmente, a faixa de temperatura da FMR ocorra por volta dessa temperatura. Porém, como a queda na energia absorvida é muito baixa, de modo que o desvio padrão engloba essa queda de energia, dessa forma podemos apenas afirmar que não houve alteração na energia absorvida entre os corpos de prova revenidos em 200°C e 300°C.

4.5 Resultados do Ensaio de Dureza

Realizado o ensaio de dureza, foi calculado a média da dureza para cada uma das amostras escolhidas (as mais significativas de cada condição de revenimento). Em seguida, foram montadas duas tabelas (tabela 9 e 10), uma com as durezas medidas de cada amostra (vale ressaltar que as amostras com temperatura de revenimento só foram realizadas 3 medidas) e a outra com as durezas médias calculadas.

Montou-se outro gráfico, porém agora de Dureza média X Condição de revenimento, utilizando os valores médios das durezas calculadas. Além disso, temos que o erro inerente do equipamento é de 0,5% (que também foi alocado no gráfico)

Tabela 9 - Durezas medidas

| Amostra | Dureza 1 (HRC) | Dureza 2 (HRC) | Dureza 3 (HRC) | Dureza 4 (HRC) | Dureza 5 (HRC) |
|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | 51,2 | 54,8 | 58,6 | 59,6 | 59,8 |
| 3 | 54,7 | 60,1 | 60,2 | 61,9 | 61,3 |
| 6 | 53,5 | 55,9 | 55,6 | 57,2 | 57,2 |
| 7 | 51 | 53,8 | 53,2 | 56 | 56,5 |
| 9 | 48,5 | 48,5 | 48,6 | - | - |
| 10 | 48 | 50,7 | 50,3 | - | - |
| 13 | 45,2 | 45,6 | 45,6 | - | - |
| 15 | 45,9 | 46,1 | 45,6 | - | - |

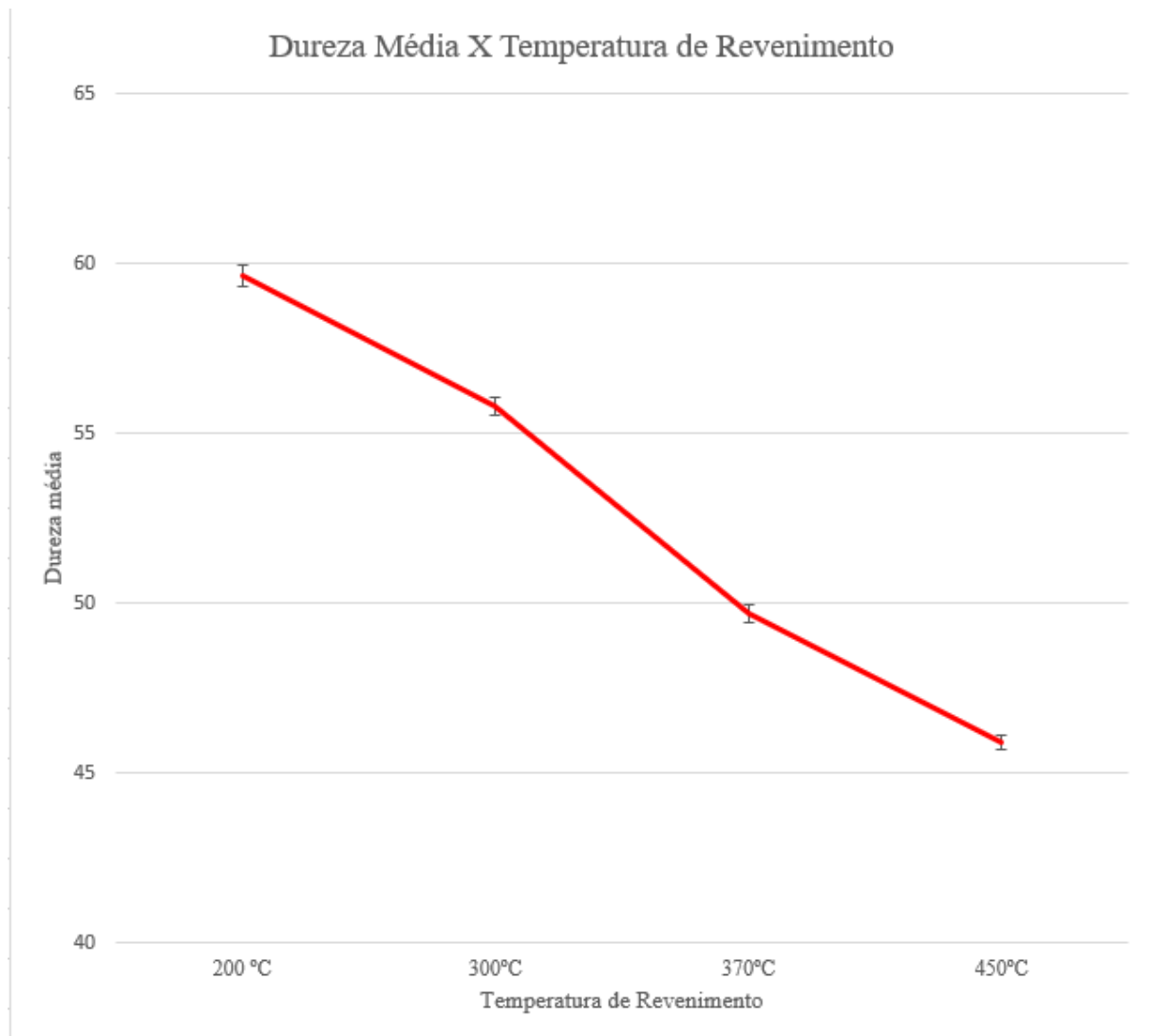
Fonte: Autor

Tabela 10 – Resultados Ensaio de Dureza

| Condição de Revenimento | Amostras | Dureza Média (HRC) |
|-------------------------|------------|--------------------|
| 900 A 200 R | Amostra 1 | |
| | Amostra 2 | 56,8 |
| | Amostra 3 | 59,64 |
| | Amostra 4 | |
| 900 A 300 R | Amostra 5 | |
| | Amostra 6 | 55,8 |
| | Amostra 7 | 54,1 |
| | Amostra 8 | |
| 900 A 370 R | Amostra 9 | 48,5 |
| | Amostra 10 | 49,7 |
| | Amostra 11 | |
| | Amostra 12 | |
| 900 A 450 R | Amostra 13 | 45,5 |
| | Amostra 14 | |
| | Amostra 15 | 45,9 |
| | Amostra 16 | |

Fonte: Autor

Figura 33 - Dureza média X Temperatura de Revenimento



Fonte: Autor

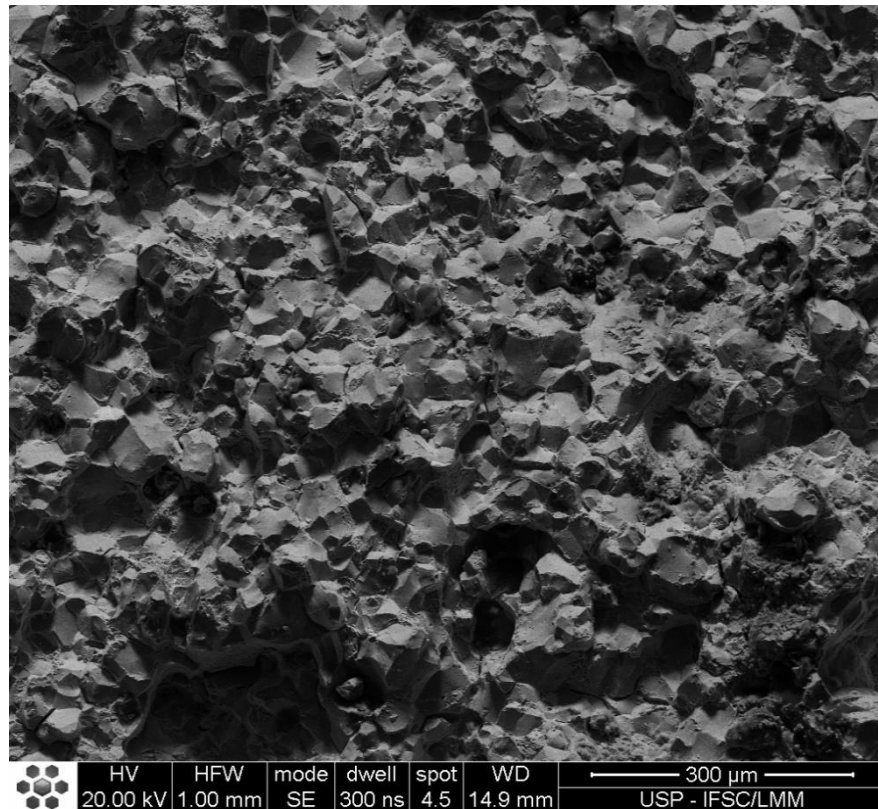
Analisando a figura 33, podemos observar que ela apresenta um comportamento de queda constante, o que é esperado para a elevação do revenimento, pois este tem por objetivo aumentar a ductilidade do material.

Porém, no corpo de prova revenido à 300 °C, o esperado era que aparecesse um leve aumento na dureza ou que ela se mantivesse a mesma, pois a energia absorvida de impacto não teve mudanças. Dessa forma, observa-se que está ocorrendo algum fenômeno de fragilização da estrutura do aço, porque na teoria, a queda na dureza leva a um aumento da ductilidade e, consequentemente, da energia absorvida no impacto (COLPAERT, 2018)

4.6 Resultados da Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

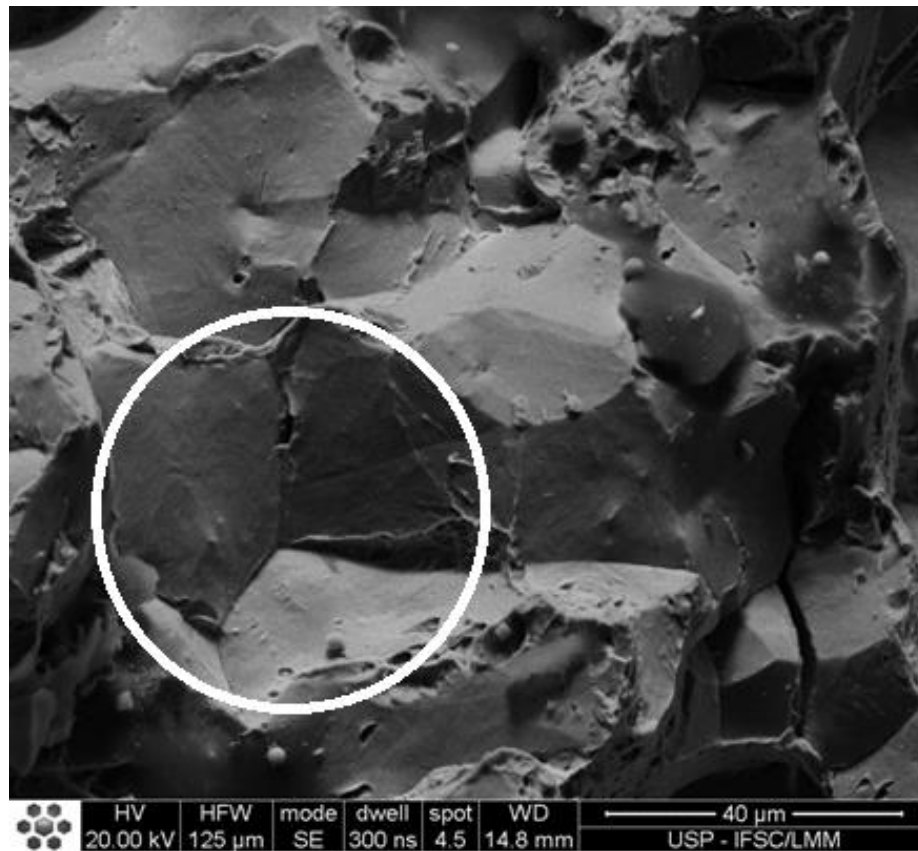
As figuras 34 a 38 apresentam as imagens de MEV das superfícies de fratura dos corpos de prova do ensaio de impacto e as figuras 39 e 40, o espectro de EDS.

Figura 34 - Superfície de Fratura do corpo de prova revenido à 300°C. Micromecanismo de fratura predominantemente intergranular.



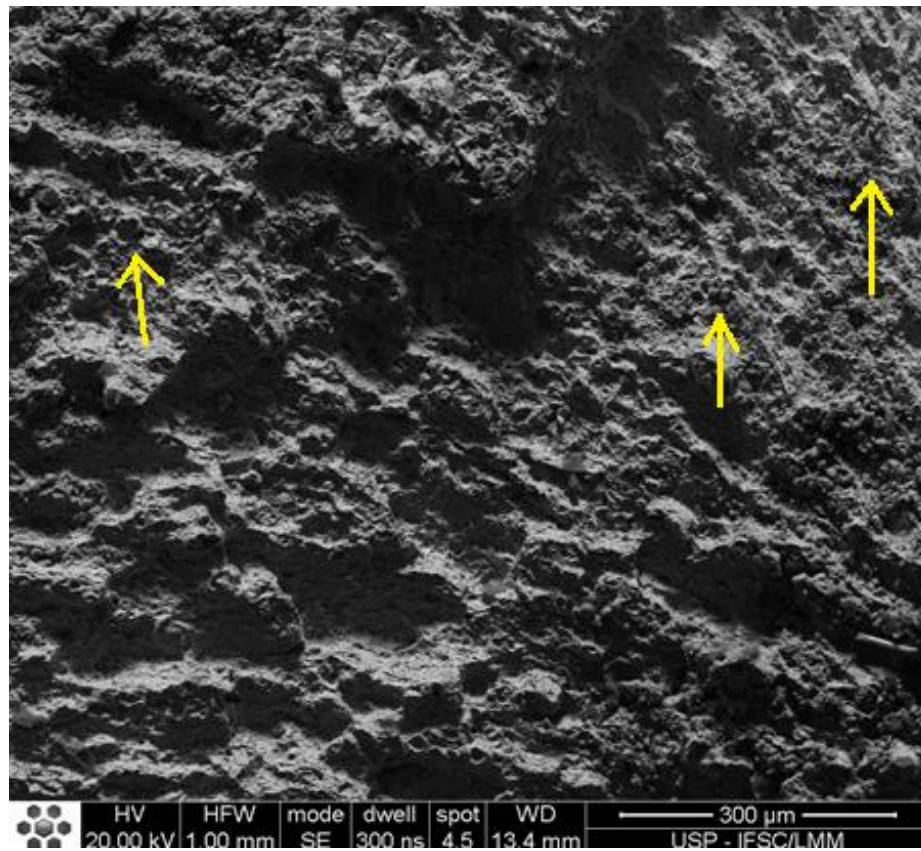
Fonte: Autor

Figura 35 – Detalhe da superfície de fratura do corpo de prova revenido à 300°C, mostrando as facetas dos grãos, o que caracteriza o micromecanismo intergranular de fratura.



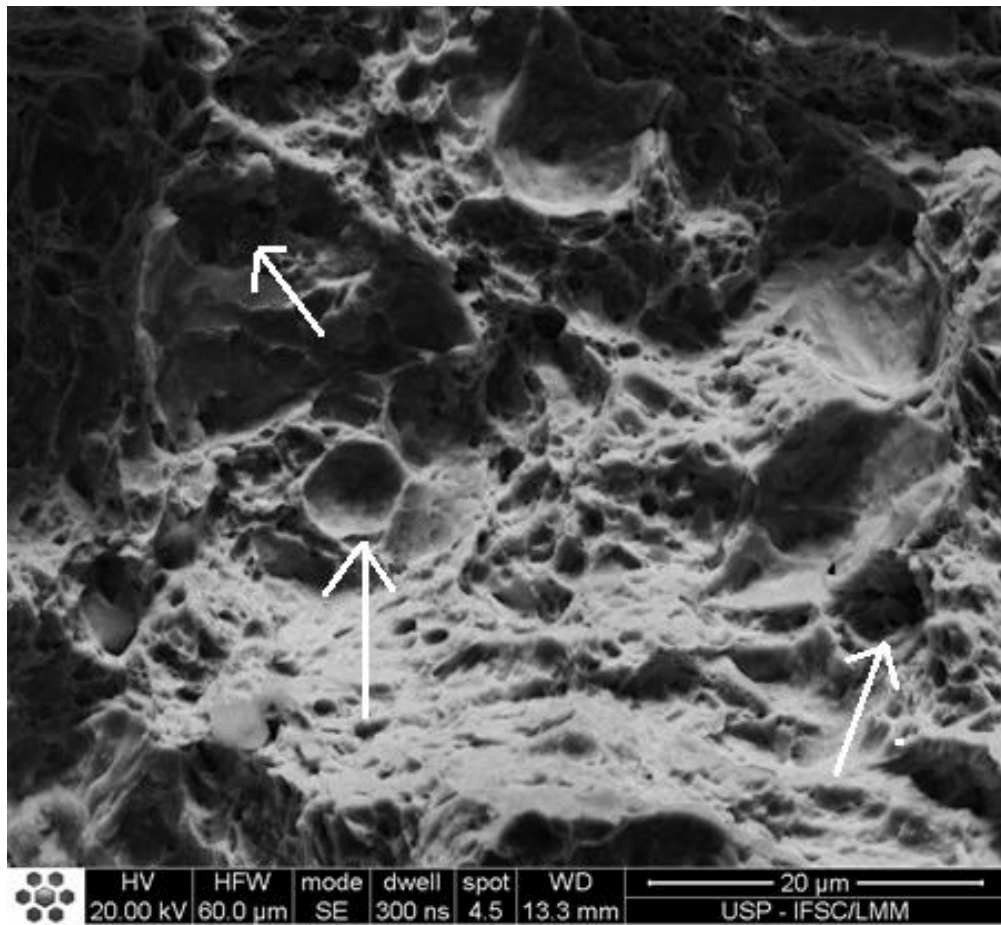
Fonte: Autor

Figura 36 - Superfície de fratura do corpo de prova revenido à 450°C, micromecanismo predominantemente transgranular, indicado pelas deformações plásticas (setas amarelas).



Fonte: Autor

Figura 37 – Detalhe da superfície do corpo de prova revenido à 450°C. As setas indicam alvéolos com grande deformação plástica: micromecanismo alveolar de fratura (micromecanismo de alta energia).

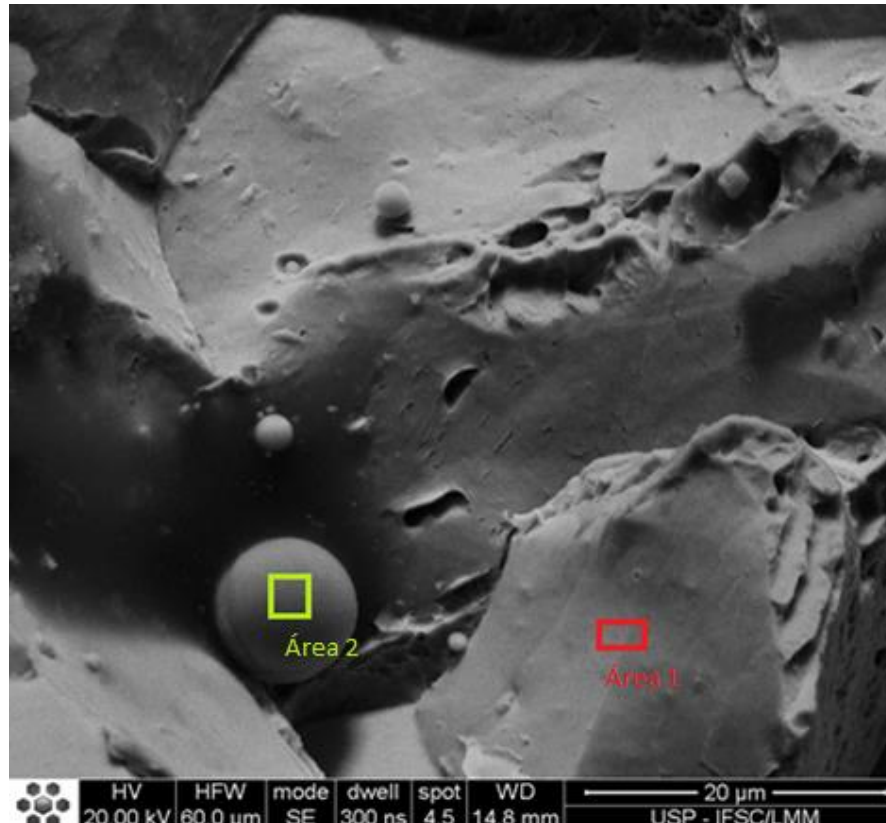


Fonte: Autor

Analisando as imagens 34 e 35, observa-se que o mecanismo de fratura que ocorreu foi predominantemente intergranular, de modo que é possível observar na figura 33 a superfície e localização dos grãos vizinhos ao que foi arrancado durante o impacto (circulo branco). Esse micromecanismo é um indicativo da possível ocorrência da precipitação de filmes de cementita entre os pacotes de ripas de martensita, cujo mecanismo é peculiar da Fragilização da Martensita Revenida.

Das imagens 36 e 37, observa-se que o mecanismo de fratura que ocorreu foi um misto de clivagem transgranular, marcada pela alta deformação plástica da superfície de fratura (apontado pelas setas amarelas na figura 36), e alveolar ou *dimples* (setas brancas na imagem 37).

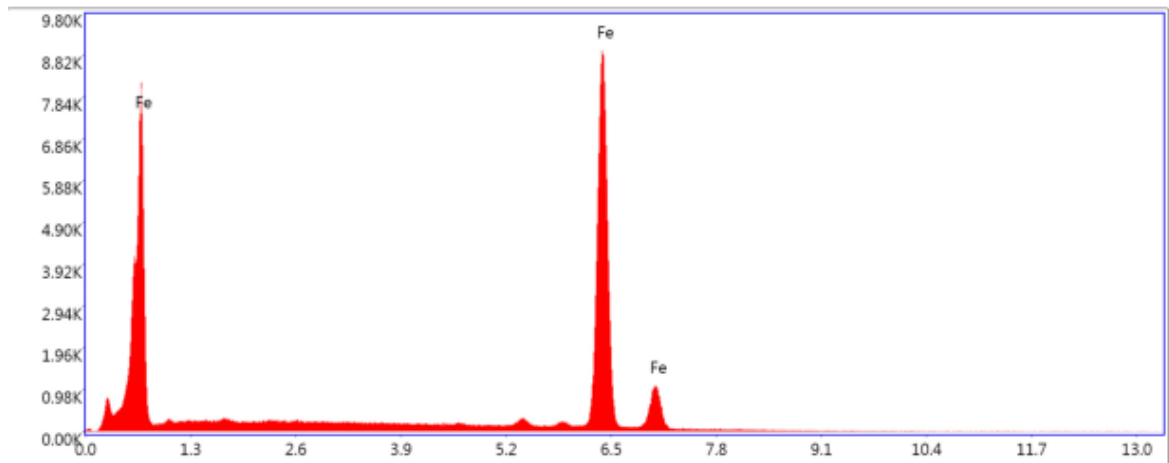
Figura 38 - Inclusão esférica na superfície de fratura do corpo de prova revenido à 300°C



Fonte: Autor

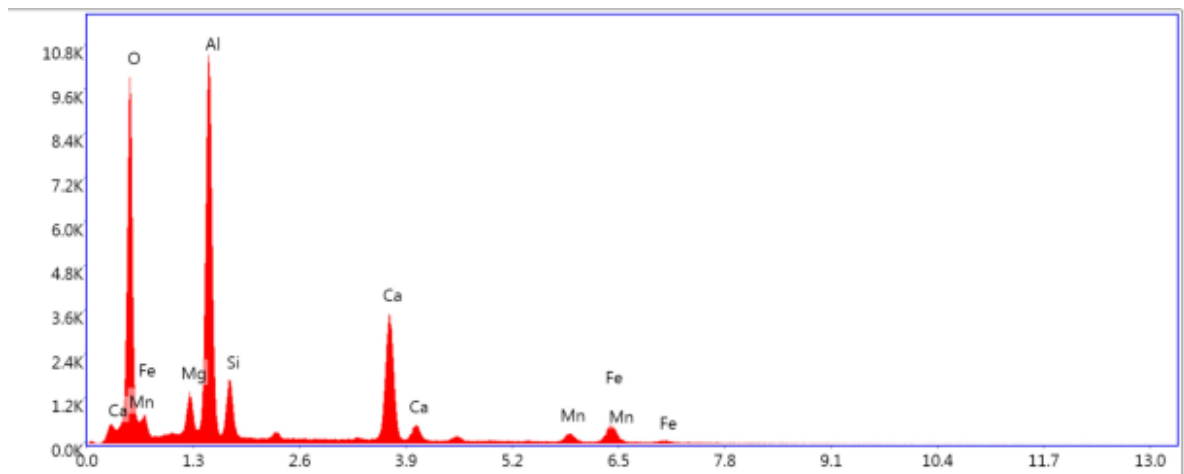
Obteve-se ainda, a imagem de uma inclusão esférica (figura 38) no meio da matriz do aço SAE 4140, foi realizado ainda o EDS para essa inclusão, as regiões utilizadas para obter o espectro foram destacadas na figura 38 (área 1 sendo o retângulo vermelho na matriz, e a área 2 sendo o retângulo verde na inclusão), obteve-se os seguintes espectros:

Figura 39 - EDS área 1



Fonte: Autor

Figura 40 - EDS área 2



Fonte: Autor

Da imagem 39, observa-se que a composição da matriz, que como esperado para um aço, é ferrítica. A imagem 40 mostra a composição da inclusão observada na imagem 36, nota-se que se trata possivelmente de uma alumina modificada pelo tratamento cálcio-silício, gerando assim um cálcio aluminato. A presença de inclusões, bem como carbonetos de forma esférica ou em bastonetes podem ser os responsáveis pelo micromecanismo alveolar (*dimples*) observado na amostra revenida à 450°C (figura 35).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da microestrutura martensítica presente nos corpos de prova ensaiados e a variação da energia absorvida no ensaio de impacto em função da temperatura de revenimento, mostra o baixo valor constante dessa energia nas temperaturas de 200°C e 300°C, e iniciando um incremento em 370°C. O fato de não haver aumento da energia absorvida no ensaio de impacto, para amostras revenidas em 300°C, em relação as que foram revenidas em 200°C, significa que os fenômenos de amolecimento que ocorrem com o aumento da temperatura de revenimento não foram suficientes para promover o aumento da tenacidade ao impacto, o que reforça a hipótese de que esteja ocorrendo algum fenômeno de fragilização, que no caso, seria a FMR. A literatura prevê, para diversos aços, a temperatura na qual ocorre a FMR com maior intensidade, 350°C. Os resultados do presente trabalho sugerem que o fenômeno ocorre na faixa de temperaturas de revenimento de 200°C a 370°C, sendo possível que ainda ocorresse uma redução maior da energia absorvida com o revenimento em 350°C. Com a realização das análises de MEV confirmou-se os mecanismos de fraturas para os corpos de prova revenidos em 300°C e 450°C, sendo que no primeiro há um mecanismo intergranular e no segundo um misto de clivagem transgranular e alveolar, dessa forma, pode-se afirmar que o mecanismo intergranular (corpo de prova revenido em 300°C) combinado com a baixa energia de impacto indica a precipitação de filmes de cementita entre os pacotes de ripas de martensita (contorno de grão austenítico prévio), caracterizando assim o fenômeno da fragilização da martensita revenida.

6 CONCLUSÃO

Analisando todos os dados obtidos, bem como as estruturas obtidas das metalografias, fica claro que as amostras foram tratadas corretamente e que temos uma estrutura martensítica para realizar o estudo e caracterizar a faixa de temperatura da FMR para o aço SAE 4140, o que fica evidenciado pelos altos valores de dureza obtidos, perto dos 60 HRC, e das baixíssimas energias absorvidas no ensaio de impacto.

Isso evidencia que as amostras possuem uma resistência mecânica extremamente alta, porém muito frágeis, por causa da dureza da martensita. Unido a isso, temos uma manutenção

na energia absorvida no ensaio de impacto entre as temperaturas de revenimento de 200°C e 300°C, como mostrado pelo gráfico (figura 30). Entretanto, essa manutenção na energia absorvida não é o suficiente para afirmarmos com clareza a faixa de temperatura exata para o fenômeno da FMR no aço SAE 4140.

Os resultados do ensaio de dureza mostram que, como houve uma redução na dureza do material, há algum fenômeno de fragilização ocorrendo na estrutura do aço estudado, podendo ser assim a martensita revenida que está fragilizada, o alvo desse estudo.

A microscopia eletrônica de varredura mostra que os mecanismos de fratura presentes nos corpos de provas revenidos à 300°C são, predominantemente, intergranulares e um misto de transgranular e dimples para os corpos de prova revenidos à 450°C. Dessa forma, o mecanismo intergranular somado à baixa energia absorção no ensaio de impacto, indica a precipitação de filmes de cementita inter ou intra-ripas de martensita, que é exatamente o principal mecanismo da FMR.

Desse modo, munidos de todos os resultados e análises, podemos verificar que o fenômeno da FMR ocorre para o aço SAE 4140 na faixa de temperatura de 200°C à 370°C, como mostrado pelos resultados dos ensaios de impacto e dureza e corroborado pelos resultados da microscopia eletrônica de varredura.

7 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Para os próximos trabalhos, recomenda-se:

- Refazer os ensaios em outras condições de revenimento, para aumentar o range do gráfico e ter uma visão mais abrangente do comportamento do aço SAE 4140.
- Realizar MEV (Microscopia eletrônica de Varredura) para analisar a superfície de fratura e verificar qual o micromecanismo de fratura.

REFERÊNCIAS

ÂNGELO, J. **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DO AÇO SAE 4140 PARA APLICAÇÃO AEROESPACIAL**. 2021.

BROOKS, C. R. **PRINCIPLES OF THE HEAT TREATMENT OF PLAIN CARBON AND LOW-ALLOY STEELS**. Materials Park: ASM international, 1996.

CALLISTER JR., W.D. (2000). **MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: AN INTRODUCTION** (5th ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.

CHIAVERINI, V. **AÇOS E FERROS FUNDIDOS**. 7^a Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COLPAERT, H. **METALLOGRAPHY OF STEELS: INTERPRETATION OF STRUCTURE AND THE EFFECTS OF PROCESSING**. [s.l.] ASM International, 2018.

ELY, L. L. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE METALURGIA LUCAS LAPIS ELY TERMODINÂMICA COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA PARA O ESTUDO DA DESOXIDAÇÃO E CONTROLE DE INCLUSÕES NOS AÇOS**. 2017

FACO, R. J. **LEVANTAMENTO DAS INCLUSÕES NOS PRINCIPAIS GRUPOS DE AÇOS PRODUZIDOS EM ACIARIA DO TIPO LD**. 2005

FERREIRA BRAGA, L. **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA DE RODAS SAE 4140 DE UTILIZAÇÃO EM PONTE ROLANTE**. 2005.

GONÇALVES, E. **ESTUDO COMPARATIVO DE TEMPERABILIDADE PARA A SUBSTITUIÇÃO DO AÇO SAE 1045 POR UM AÇO SAE 4140 APLICADO A ENGRENAGENS FUNDIDAS**. 2021.

HERTZBERG. W. (1996). **DEFORMATION AND FRACTURE MECHANIC OF ENGINEERING MATERIALS**, 4th Edition, John Wiley & Sons.

HONEYCOMBE, R.; H. K. D. H. BHADOSHIA. **STEELS**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1996.

HORN, R. M.; RITCHIE, R. O. **MECHANISMS OF TEMPERED MARTENSITE EMBRITTLEMENT IN LOW ALLOY STEELS**. Metallurgical Transactions A, v. 9, n. 8, p. 1039–1053, ago. 1978.

JUSTO, F. **UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS TÊMPERA E DUPLO REVENIMENTO NA FAIXA DE FRAGILIZAÇÃO DO AÇO SAE 4340 SÃO CARLOS 2018**.

LEIGHTLY, H. P.; BRAMFITT, B. L.; LAWRENCE, S. J. **RMS TITANIC: A METALLURGICAL PROBLEM**. Practical Failure Analysis, v. 1, n. 2, p. 10–13, abr. 2001.

MARCOMINI, J. B. **FRAGILIZAÇÃO DA MARTENSITA REVENIDA NO AÇO SAE 5160H**. 2006

MARCOMINI, J. B. **CARACTERIZAÇÃO DA NOVA LIGA FE-C-MN-SI-CR: FRAGILIZAÇÃO DA MARTENSITA REVENIDA E CURVAS DE REVENIMENTO**. 2012

MARCOMINI, J.; ANTONIO, C.; PEREIRA BAPTISTA, R. **Caderno Técnico ACIDENTES E INCIDENTES MOTIVARAM AVANÇOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS NA ÁREA DA MECÂNICA DA FRATURA**. [s.l: s.n.]. Acesso em: 21 jun. 2023.

PEREIRA, A. S. et al. **ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE DOS AÇOS 8640, 4140 E 4340**. III Simpósio de Tecnologias da Fatec de Sertãozinho (SITEFA/Stz), 28 dez. 2020.

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. **PHASE TRANSFORMATIONS IN METALS AND ALLOYS**. Boca Raton, Fl: Crc Press, 2009.

SCHMIDT, G. **RELAÇÃO ENTRE MICROESTRUTURA E USINABILIDADE DO AÇO SAE 4140**. 2021.

SCOPEL, M.; ROSSO, R.; PERUCH³, F. **ESTUDO DE DESGASTE ABRASIVO DO MATERIAL ASTM SC 4140 APÓS TRATAMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÕES EM ESCAVADEIRA DE MINERAÇÃO**.