

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEMEC – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

DIEGO DO NASCIMENTO VIRÍSSIMO

**AVALIAÇÃO DE MEDIDAS ULTRASÔNICAS EM AÇOS ARBL SUBMETIDOS A
DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2020**

DIEGO DO NASCIMENTO VIRÍSSIMO

**AVALIAÇÃO DE MEDIDAS ULTRASÔNICAS EM AÇOS ARBL SUBMETIDOS A
DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do DEMEC, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Matheus Campolina Mendes

Co-orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge

RIO DE JANEIRO

2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

V818 Viríssimo, Diego do Nascimento
Avaliação de medidas ultrasônicas em aços ARBL submetidos a diferentes tratamentos
térmicos / Diego do Nascimento Viríssimo – 2020.
82f : il.color. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da
Fonseca, 2020.

Bibliografia: f. 79-82

Orientadora: Matheus Campolina Mendes

Co-orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge

1. Engenharia mecânica. 2. Aço – Tratamento térmico. 3. Ultrassom.
I. Mendes, Matheus Campolina (Orient.). II. Jorge, Jorge Carlos Ferreira (Orient.).
III. Título.

CDD 620.1

Dedico esse trabalho a José, o
carpinteiro, e a seu Filho.

AGRADECIMENTOS

São muitos os que carregam esse trabalho junto comigo, posso dizer que é um trabalho feito a muitas mãos.

Começando pelos esforços dos meus pais, que sempre priorizaram e financiaram a minha educação, partilhando cada vitória e descontentamento.

Agradeço à minha noiva, que esteve do meu lado em todas as crises de ansiedade com provas, prazos e nas comemorações, é claro. O combustível desse trabalho é nossa família

Depois de onze anos, contando ensino médio técnico e graduação, não poderia deixar de agradecer ao CEFET-RJ, pelo papel importantíssimo que teve na minha formação, entrei criança e saí engenheiro.

E, finalmente, um agradecimento muito especial ao homem mais honrado que tive prazer de conhecer nessa instituição, que fez o possível e o impossível para tornar esse trabalho viável. Muito obrigado, Prof. Matheus Campolina, por ter sido meu mestre, amigo e conselheiro nesses tempos difíceis.

RESUMO

VIRISSIMO, Diego. **Avaliação de medidas ultrassônicas em aços ARBL submetidos a diferentes tratamentos térmicos**. 2021. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

Este trabalho foi desenvolvido a fim de avaliar a possibilidade de aplicação do uso da técnica não destrutiva por ultrassom na determinação de características microestruturais que possam ser correlacionadas aos tratamentos térmicos aplicados em um aço do tipo ARBL. Esses aços são largamente utilizados na indústria do óleo e gás, em aplicações críticas, onde se deseja caracterizar e avaliar o material sem causar danos ao equipamento ou gerar paradas operacionais. Portanto, esse trabalho teve como objetivo avaliar as medidas ultrassônicas em aços ARBL sob diferentes condições de tratamento térmico, tomando para análise o aço AISI 8630M2 e submetendo-o aos tratamentos térmicos de têmpera e recozimento. Foram realizadas análises de microestrutura, obtendo-se micrografias através do microscópio ótico e pelo microscópio eletrônico de varredura, e realizado um ensaio de microdureza vickers de nas amostras. Os dados obtidos foram comparados aos valores de atenuação sônica e velocidade de propagação resultantes do ensaio de ultrassom ao qual essas amostras foram submetidas. Foram analisados três grupos de amostras, uma considerando o material na condição como recebido (temperado e revenido), um temperado e outro recozido, e avaliado as medidas de ultrassom considerando parâmetros como densidade de discordâncias, microestrutura, tamanho de grão e dureza. Observou-se por meio deste trabalho que o histórico de tratamento térmico gera significativa influência sobre os valores de atenuação sônica, e que a densidade de discordâncias se apresenta como um parâmetro em potencial para a correlação entre as propriedades mecânica e microestruturais e as medidas ultrassônicas.

Palavras-chave: Ultrassom. Velocidade de propagação. Atenuação. Microestrutura. Tratamento térmico. Densidade de discordâncias. Dureza.

ABSTRACT

VIRISSIMO, Diego. **Evaluation of ultrasonic measurements in HSLA steels submitted to different heat treatments** 2021. 82 f. Course Conclusion Work - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

This work was developed in order to evaluate the possibility of applying the non-destructive ultrasound technique to determine microstructural characteristics that can be correlated to the heat treatments applied to an HSLA steel. These steels are widely used in the oil and gas industry, in critical applications, where it is desired to characterize and evaluate the material without causing damage to the equipment or generating operational stops. Therefore, this work aimed to evaluate the ultrasonic measurements in HSLA steels under different heat treatment conditions, taking for analysis the AISI 8630M2 steel and submitting it to quenching and annealing heat treatments. Microstructure analyses were performed, obtaining micrographs through optical microscope and scanning electron microscope, and a Vickers microhardness test was performed on the samples. The data obtained were compared to the values of sonic attenuation and propagation velocity resulting from the ultrasonic test to which these samples were submitted. Three groups of samples were analyzed, one considering the material in the condition as received (quenched and tempered), one tempered and one annealed, and evaluated the ultrasonic measurements considering parameters such as dislocation density, microstructure, grain size and hardness. It was observed through this work that the history of heat treatment generates significant influence on the values of sonic attenuation, and that the dislocation density presents itself as a potential parameter for correlation between mechanical and microstructural properties and ultrasonic measurements.

Keywords: Ultrasound. Propagation Velocity. Attenuation. Microstructure. Heat Treatment. Discordance Density. Hardness. As Received. Tempered. Annealed

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 : Ilustração esquemática do mecanismo de oscilação de ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2018).....	20
Figura 2-2 : Ilustração esquemática do mecanismo de oscilação de ondas transversais (ANDREUCCI, 2018)	21
Figura 2-3: Ilustração de um feixe sônico distinguindo-se as zonas do feixe sônico (Adaptado de ANDREUCCI, 2018)	25
Figura 2-4 : Transdutor normal ou reto (Adaptado de ANDREUCCI, 2018).....	29
Figura 2-5 : Transdutor angular (Adaptado de ANDREUCCI, 2013).....	30
Figura 2-6 : Transdutor duplo cristal (Adaptado de ANDREUCCI, 2018).....	31
Figura 2-7 : Transdutor Phased Array (Adaptado de ANDREUCCI, 2018)	32
Figura 2-8: Esquemático da detecção de microfissuras através da técnica Pulso Eco de ensaio de ultrassom (ANDREUCCI, 2018).....	34
Figura 2-9: Diagrama TTT do aço AISI 8630 (Adaptado de ASM, 1994)	48
Figura 2-10 : Diagrama comparativo de curvas de temperabilidade para aços com mesma composição química e diferentes porcentagens de carbono obtidas por ensaio Jominy (Adaptado de CALLISTER, 2010)	49
Figura 2-11: Profundidade da têmpera em um aço AISI 8630 (CANTARIN, 2010)...	50
Figura 2-12 – Imagem obtida por microscopia ótica de amostras retiradas em várias espessuras diferentes na amostra do aço AISI 8630 comum – Aumento de 200x (CANTARIN,2011).....	51
Figura 2-13: Variação das propriedades mecânicas de acordo com a temperatura de revenimento no aço AISI 8630 (Adaptado de ASM, 1990).....	51
Figura 4-1 : Fotografia retirada do tanque de imersão do ensaio de ultrassom contendo as amostras, o transdutor e o termômetro (Adaptado de SILVA, 2020)	58
Figura 4-2 : Imagem obtida por microscopia ótica da amostra CR. Microestrutura composta por martensita revenida. Ataque com ácido pícrico saturado em água. Aumento 500x	60
Figura 4-3 : Imagem obtida por microscopia ótica da amostra CR. Microestrutura composta por martensita revenida. Ataque com nital 2%. Aumento 1000X.....	61
Figura 4-4 : Fotomicrografia apresentando microestrutura composta por martensita revenida. Ataque nital 2%. Aumento de 100x (DUARTE, 2014).....	62
Figura 4-5 : Resultados EBSD para a Varredura 1 da amostra como recebido. Aumento 500X.(a) Martensita (b) Austenita Prévia	63
Figura 4-6 : Resultados EBSD para a Varredura 2 da amostra como recebido. Aumento 500X. (a) Martensita (b) Austenita Prévia	64
Figura 4-7 : Imagem obtida por microscopia ótica da amostra T. Microestrutura composta por martensita. Aumento de 500x.....	66
Figura 4-8 : Imagem obtida por microscopia ótica da amostra T. Microestrutura composta por martensita revenida. Ataque com nital. Aumento de 1000X.	67
Figura 4-9 : Imagem obtida por microscopia ótica da amostra R. Microestrutura composta por ferrita e perlita. Ataque com nital. Aumento de 500x	68
Figura 4-10 : Curva correlacionando tratamento térmico x coeficiente de atenuação sônica.....	69

Figura 4-11 : Curva correlacionando tratamento térmico x velocidade de propagação	70
Figura 4-12 : Resultados obtidos nos ensaios de dureza para cada condição de tratamento térmico	72
Figura 4-13 : Imagem correlacionando curvas de dureza e velocidade de propagação de ondas longitudinais.....	73
Figura 4-14 : Imagem correlacionando curvas de dureza e velocidade de propagação de ondas transversais	73
Figura 4-15 : Imagem correlacionando os valores de dureza e atenuação sônica....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 : Composição química dos aços AISI 8630 comum e AISI 8630 modificado (Adaptado de CANTARIN, 2011)	477
Tabela 2-2 : Valores obtidos em ensaio de tração para o aço AISI 8630 comum temperado a 880°C e revenido a 660°C - 6h em relação a espessura (Adaptado de CANTARIN, 2011).....	52
Tabela 3-1 : Composição química do material recebido	53
Tabela 3-2 : Identificação das amostras por condições de tratamento térmico.....	54
Tabela 4-1 : Valores de velocidade de onda ultrassônica e atenuação de sinal (SILVA,2020).....	59
Tabela 4-2 : Resultados obtidos no ensaio de ultrassom para as amostras CR e T (Adaptado de SILVA, 2020).....	65
Tabela 4-3 : Resultados dos ensaios de dureza e microdureza realizados nas amostras.....	71
Tabela 4-4 : Parâmetros ultrassônicos incluindo Ruv (Adaptado de SILVA,2020)....	76

LISTA DE ABREVIATURAS

Carac.	Caracterização
Rev.	Revisão
Microest.	Microestrutural

LISTA DE SIGLAS

ANM	Árvore de Natal Molhada
API	American Petroleum Institute
ARBL	Alta Resistencia Baixa Liga
CR	Como Recebido
EBSD	Electron backscatter diffraction
MO	Microscópio Óptico
R	Recozido
T	Temperado

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção
END	Ensaios Não Destrutivos
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PLEM	Pipe Line End Manifold
PLET	Pipe Line End Termination
TOF	Time of Flight

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	17
2.2 ULTRASSOM.....	18
2.2.1 Princípios Físicos.....	19
2.2.1.1 Ondas ultrassônicas.....	19
2.2.1.1.1 Ondas longitudinais	19
2.2.1.1.2 Ondas transversais (cisalhamento).....	20
2.2.1.1.3 Ondas superficiais (Rayleigh)	21
2.2.1.1.4 Ondas Lamb (placa)	22
2.2.1.2 Parâmetros de onda.....	22
2.2.1.2.1 Frequência	22
2.2.1.2.2 Velocidade de propagação	23
2.2.1.2.3 Comprimento de onda	23
2.2.1.2.4 Amplitude	23
2.2.2 Geração e Recepção de Ondas Ultrassônicas	23
2.2.2.1 Efeito piezométrico.....	24
2.2.2.2 O feixe ultrassônico.....	24
2.2.2.2.1 Campo próximo (zona de Fresnel).....	25
2.2.2.2.2 Zona de transição	25
2.2.2.2.3 Campo distante (zona de Fraunhofer)	26
2.2.2.3 Atenuação.....	26
2.2.2.3.1 Perdas de transmissão	26
2.2.2.3.2 Efeitos de interferência	27
2.2.2.3.3 Dispersão do feixe	27
2.2.2.4 Transdutores	27
2.2.2.4.1 Transdutor normal.....	28
2.2.2.4.2 Transdutor angular.....	29
2.2.2.4.3 Transdutor duplo-cristal	30
2.2.2.4.4 Transdutor phased array.....	31
2.2.2.4.5 Transdutor de imersão	32
2.2.3 Métodos de Inspeção por Ultrassom	33
2.2.3.1 Pulso eco	33
2.2.3.2 Transparência	34
2.2.3.3 Teste por contato e teste por imersão.....	35
2.2.3.3.1 Teste por contato	35
2.2.3.3.2 Teste por imersão	35
2.2.4 Aparelhagem.....	36

2.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL POR MEIO DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS	37
2.3.1 Parâmetros de Teste Ultrassônico Para a Caracterização dos Materiais	38
2.3.1.1 Velocidade	39
2.3.1.2 Atenuação	40
2.3.1.3 Amplitude	41
2.3.1.4 Análise espectral	41
2.3.1.5 Ângulo crítico	42
2.3.2 Medidas da Caracterização dos Materiais por Medidas Ultrassônicas	42
2.3.2.1 Medição de tamanho de grão	42
2.3.2.2 Identificação de inclusões não metálicas	43
2.3.2.3 Determinação do módulo de elasticidade	43
2.3.2.4 Estimativa de dureza	43
2.3.2.5 Monitoramento da temperatura de transição dúctil frágil	44
2.4 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA	44
2.4.1 Aços API	45
2.4.2 Aço 8630	46
2.4.2.1 Composição química	46
2.4.2.2 Microestrutura e propriedades mecânicas	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 MATERIAL	53
3.1.1 Composição Química	53
3.1.2 Tratamento térmico	53
3.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA	54
3.2.1 Preparação das Amostras	54
3.2.2 Análise Micrográfica	55
3.3 ANÁLISE DE DUREZA	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 ULTRASSOM	57
4.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	60
4.2.1 Material Como Recebido	60
4.2.1.1 Caracterização por microscopia ótica	60
4.2.2 Caracterização por MEV-EBSD	62
4.2.3 Amostra Temperada (T)	66
4.2.4 Amostra Recozida (R)	67
4.2.5 Comparação Entre as Amostras	68
4.3 DUREZA	71
4.4 PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS E O COEFICIENTE DE <i>POISSON</i>	76
5 CONCLUSÕES	77
6 TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Dados publicados na Resenha Energética Brasileira, em 2019, a serviço do Ministério de Minas e Energia (MME), apontam que, no ano de 2018, 34,4% da matriz energética nacional provém de derivados do petróleo e, de acordo a mesma revista, essa fonte é responsável por 31,7% da matriz energética mundial. Segundo a Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Departamento de Informações e Estudos Energéticos, da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o Brasil produziu 1.017.531.453 barris de petróleo, em 2019. A partir desses dados, pode-se observar que a indústria de óleo e gás ainda protagoniza o cenário energético brasileiro e mundial, assumindo um papel fundamental na economia.

O petróleo é formado a partir da decomposição da matéria orgânica proveniente de animais mortos, plantas ou outros seres, depositados e submetidos por um longo período a uma condição de alta temperatura e pressão, de forma a gerar hidrocarbonetos que formam os óleos e gases tão utilizados para a geração de energia e em outros ramos da indústria. Esses produtos se formam em reservatórios naturais de onde são extraídos e transportados para diversos estágios de processamento, refino e transformação, até chegar em suas aplicações finais a quais são destinados.

Para a extração, produção, separação e transporte destes fluidos, são necessários diversos tipos de estruturas e equipamentos submarinos, como *Árvore de Natal Molhada (ANM)*, *Manifold*, *Pipe Line End Termination (PLET)*, *Pipe Line End Manifold (PLEM)*, dutos rígidos, dutos flexíveis, entre outros.

Esses equipamentos são submetidos a pressões elevadas, tanto internamente, com a passagem dos fluidos, como externamente, pois são instalados sob altíssimas colunas d'água. Portanto, essas estruturas, devem atender requisitos de custo, resistência a corrosão, peso e soldabilidade (BAY, 2001).

Por isso, são utilizados na fabricação de equipamentos empregados nesse tipo de aplicação, aços que atendam esse tipo de solicitações mecânicas. O AISI 8630, por exemplo, é um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) que, ao ser modificado em sua composição química ou combinado com outro material, é aplicado na fabricação de equipamentos submarinos devido aos seus valores elevados de resistência mecânica e tenacidade (SILVA,2020).

Um exemplo de aplicação desse material está nas juntas dissimilares, que são utilizadas na união dos componentes submarinos e permitem a transição entre válvulas conectores, reguladores de fluxos e outros componentes (OLIVEIRA, 2013). Outro exemplo, está na utilização de níquel 625 como revestimento do AISI 8630 na fabricação de estruturas submarinas, com o objetivo de aumentar a resistência à corrosão (CANTARIN, 2011).

A *American Petroleum Institute* (API), regulamenta as normas e requisitos de fabricação de equipamentos utilizados nos sistemas de transporte de petróleo e seus derivados na indústria de óleo e gás. A norma API 5L regulamenta a fabricação de tubos, com ou sem costura, de aço carbono, sendo classificados de acordo com o seu limite de escoamento. Portanto os aços API X80, corresponde a aços de alta resistência com limite de escoamento na ordem de 80 ksi, por exemplo (JUNIOR *et al.*, 2013). Já a norma API 6A, especifica os requisitos para o desenvolvimento de equipamentos para árvores de natal e *wellhead*, de forma a garantir o desempenho e a intercambialidade dimensional e funcional dos componentes. Aí se incluem especificações de conectores, flanges, suspensores, válvulas etc. (API Specification 6A, 2003). Os aços AISI 8630 estão em conformidade com a norma API 6A na fabricação de conectores.

Considerando as premissas de custo, produtividade e complexidade operacional desse tipo de aplicação, bem como em outros casos em que as paradas operacionais são custosas e o produto é de alto valor agregado, estudam-se soluções estratégicas para a análise microestrutural e identificação de eventuais mudanças de microestrutura, de forma que não haja perdas e danos no material a ser ensaiado. Neste sentido, os ensaios não destrutivos (END) são soluções onde é possível ensaiar amostras sem causar danos a elas, e por isso podem ser utilizadas em todo o processo de produção.

Um tipo de ensaio não destrutivo muito comum é a técnica de ultrassom. Essa técnica tem como finalidade a detecção e dimensionamento de defeitos e descontinuidades internas, causadas pelo próprio processo de fabricação ou por condições as quais são submetidos os corpos de prova (ANDREUCCI, 2018). Recentemente, muito estuda-se a utilização de ensaio de ultrassom para a caracterização microestrutural, possibilitando a inferência da presença e proporção de constituintes na microestrutura com base nos dados extraídos do ensaio não destrutivo.

Este trabalho tem como objetivo a caracterização do ponto de vista microestrutural e mecânico de aços de alta resistência AISI 8630 modificados, submetidos a diferentes tratamentos térmicos de têmpera e revenido, comparando os resultados apresentados em técnicas convencionais de análise microestrutural e de propriedades mecânicas e os resultados apresentados utilizando-se técnicas de ensaio de ultrassom.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

De forma a atender requisitos de segurança e qualidade de um determinado produto, garantindo assim a satisfação do cliente ou usuário, a qualidade do mesmo deve ser verificada durante todo o processo de fabricação, desde sua matéria prima até o produto final, incluindo inspeções e verificações periódicas durante sua operação (FREITAS, 2009). Essas verificações durante todo o processo, são necessárias para conferir se as propriedades mecânicas e químicas do material são compatíveis com os esforços e condições operacionais que serão aplicados em sua utilização.

Os ensaios mecânicos são procedimentos padronizados e estabelecidos por norma que servem de ferramentas para determinar os valores das propriedades dos materiais. Existem duas classificações principais de ensaios mecânicos que dizem respeito a ocorrência ou não de dano na peça ensaiada, são elas: ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos.

Segundo a Associação Brasileira de Ensaios Não destrutivos e inspeção (ABENDI), os ensaios não destrutivos são técnicas e métodos utilizados na inspeção de equipamentos de forma que não causem-nos danos. Essas técnicas são aplicadas em todas as fases do processo produtivo, incluindo: fabricação, construção, montagem e manutenção (ABENDI, 2021).

Esse tipo de ensaio é uma excelente alternativa no que tange a detecção de defeitos, à análise das características e estruturas de um material, ou ainda no que diz respeito ao campo da manutenção predial e suas implicações, através do monitoramento do desempenho e estado de conservação de uma peça em operação.

Os ensaios não destrutivos levam em consideração a importância do ativo e a impossibilidade de amostragem, realizando os testes sem a necessidade de remover parte do produto, ou causar dano ao mesmo.

Existem diversos tipos de END que atendem a grande parte dos tipos de materiais, metálicos ou não metálicos. A ABENDI, 2021, enumera os ensaios não destrutivos:

- Correntes Parasitas
- Emissão Acústica

- Ensaio Visual
- Estanqueidade
- Líquido Penetrante
- Partículas Magnéticas
- Radiografia, Radioscopia e Gamagrafia
- Termografia
- Ultrassom

Neste trabalho iremos nos ater ao ensaio de ultrassom.

2.2 ULTRASSOM

A terminologia “ultrassom”, se refere às ondas sonoras de alta frequência, ou seja, acima de 20 kHz, inaudíveis aos ouvidos humanos. Como toda onda mecânica, ao ir de encontro a um corpo, se propaga através dele, sendo parcialmente refletida. Este princípio, é a base dos ensaios não destrutivos de ultrassom (ANDREUCCI, 2018).

Por se tratar de ondas mecânicas, a técnica de ultrassom pode ser utilizada em materiais metálicos ou não metálicos, ferrosos ou não ferrosos, visto que essas ondas necessitam de um meio elástico para se propagar. Este meio pode ser sólido, líquido ou gasoso, e se tratando de materiais, pode se propagar tanto em metais, como em plásticos, materiais poliméricos, compósitos, entre outros (SANTIN, 2003) . Esta característica confere versatilidade a esse método de END.

Portanto, o ensaio de ultrassom, consiste num método não destrutivo de detecção de falhas, defeitos e discontinuidades em peças metálicas ou não metálicas, através da passagem de ondas ultrassônicas através desses materiais, com uma posterior leitura e interpretação dos dados provenientes do ensaio.

Pelas características citadas anteriormente, o ensaio de ultrassom tem uma grande gama de aplicações. Apesar de serem mais utilizados em aços carbono, podem ser utilizados em diversos tipos de materiais, ainda que seja necessária a utilização de procedimentos de adequação. Além disso, esses ensaios podem ser realizados em peças de grande espessura, também não encontrando problemas

diante de geometrias complexas (ANDREUCCI, 2018). São amplamente utilizados na análise e detecção de defeitos e inclusões em juntas soldadas (SANTIN, 2003).

Para entender mais detalhadamente as aplicações e vantagens desta técnica de ensaios não destrutivos, é necessário compreender seu princípio físico, como se dá a geração das ondas ultrassônicas, seus métodos de inspeção e aparelhagem. Estes conceitos serão desenvolvidos nos próximos tópicos.

2.2.1 Princípios Físicos

Nesta seção serão abordados os princípios físicos que permeiam a técnica de inspeção por ultrassom. Será abordado o que é uma onda ultrassônica, como ela se comporta, sua classificação, características e seus parâmetros.

2.2.1.1 Ondas ultrassônicas

Como mencionado anteriormente, a onda ultrassônica é uma onda mecânica que se propaga em meios sólidos, líquidos e gasosos, e como toda onda mecânica, consiste em oscilações de partículas atômicas no seu meio de propagação (SANTIN, 2003).

A relação entre o modo de oscilação destas partículas e o meio de propagação, influencia tanto nos parâmetros de onda (velocidade, amplitude e comprimento de onda), como no seu tipo, considerando-se um meio elástico onde as partículas estão ligadas entre si e podem oscilar em qualquer direção (SANTIN, 2003). Os tipos de onda são classificados em quatro tipos:

2.2.1.1.1 Ondas longitudinais

Nesse tipo de onda, as partículas oscilam na direção de propagação da onda, gerando no meio “zonas de compressão” e “zonas de diluição”. Pode se propagar tanto em sólidos e líquidos, como em gases (ANDREUCCI, 2018).

Por conta da sua mecânica de propagação, as ondas longitudinais possuem uma velocidade elevada, podendo atingir uma velocidade de aproximadamente 330 m/s no ar e 6000 m/s no aço, por exemplo (SANTIN, 2003)

As ondas longitudinais (**Figura 2-1**) são as mais utilizadas nas inspeções por ultrassom.

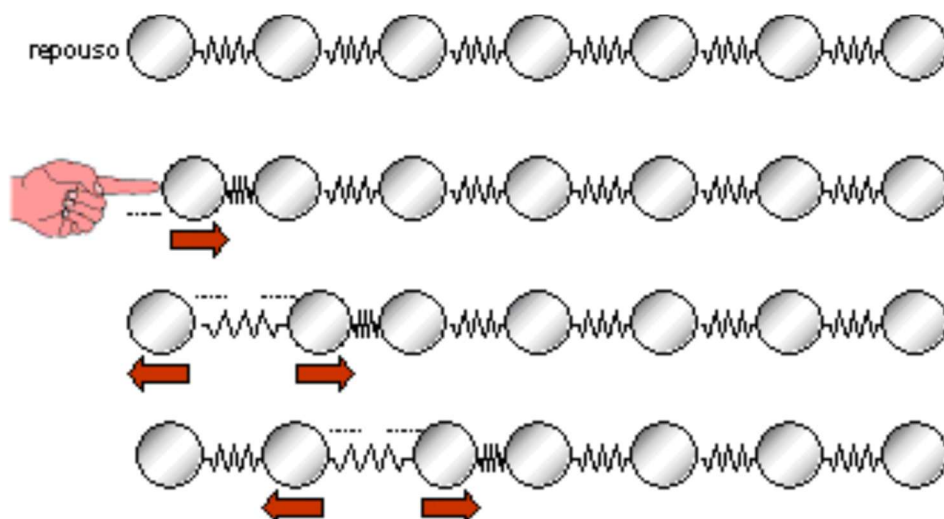


Figura 2-1 : Ilustração esquemática do mecanismo de oscilação de ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2018)

2.2.1.1.2 Ondas transversais (cisalhamento)

Sendo também muito utilizadas nos ensaios, as ondas transversais são caracterizadas por ter a direção de oscilação das partículas sendo perpendicular ao sentido de propagação da onda (ANDREUCCI, 2018).

Por conta da característica de ligações intermoleculares dos meios gasosos e líquidos, onde a força de coesão entre as partículas é menor, as ondas transversais não se propagam nesses meios (SANTIN, 2003).

A velocidade de propagação desse tipo de onda, corresponde a aproximadamente 50% da velocidade de propagação das ondas longitudinais (SANTIN, 2003). Seguindo o exemplo do aço, observa-se uma velocidade de propagação de aproximadamente 3200 m/s (ANDREUCCI, 2018). A **Figura 2-2** demonstra esquematicamente como se comportam as ondas transversais.

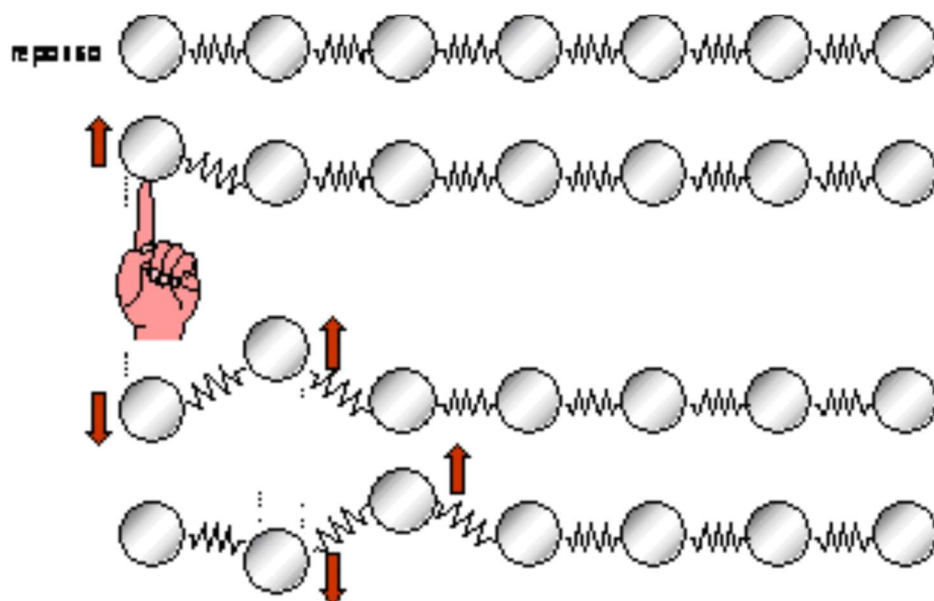


Figura 2-2 : Ilustração esquemática do mecanismo de oscilação de ondas transversais (ANDREUCCI, 2018)

2.2.1.1.3 Ondas superficiais (*Rayleigh*)

São assim denominadas por se propagar na superfície de sólidos. Segundo ANDREUCCI (2018) e SIQUEIRA (2016), um complexo movimento oscilatório combinando ondas longitudinais e transversais, gera um movimento elíptico na interface entre o meio sólido e o ar.

Por conta da complexidade do movimento descrito, as ondas superficiais possuem uma velocidade de propagação aproximadamente 10% inferior às ondas do tipo transversal (SANTIN, 2003).

Pelas características mencionadas anteriormente, esse tipo de onda tem seu campo de aplicação restrito à inspeção de camadas finas de materiais de revestimento. Outra desvantagem está no fato de ser facilmente refletida na presença de impurezas na superfície, o que causa uma atenuação da onda. Em compensação, as ondas de *Rayleigh* são eficientes na detecção de discontinuidades superficiais, visto que possuem alta sensibilidade (ANDREUCCI, 2018).

2.2.1.1.4 Ondas Lamb (placa)

São uma particularidade das ondas superficiais. Nesse caso, as ondas possuem um comprimento de onda próximo a espessura da peça ensaiada, não se restringindo, portanto, à superfície do material, mas a toda sua constituição (ANDREUCCI, 2018). Esse tipo de onda pode ser gerado a partir de um ângulo de inclinação das ondas longitudinais em relação a peça ensaiada (SANTIN, 2003).

2.2.1.2 Parâmetros de onda

No tópico anterior, foram listados os tipos de onda que podem ser utilizados no ensaio ultrassônico, no entanto, é necessário também selecionar os parâmetros necessários para que a inspeção seja realizada com sucesso e cumpra os seus objetivos. Os principais parâmetros de onda são: frequência, velocidade e comprimento de onda.

2.2.1.2.1 Frequência

Como já mencionado anteriormente, as ondas consistem na oscilação de partículas atômicas em torno de sua posição de equilíbrio em determinado meio. Essas oscilações se repetem em determinado intervalo de tempo, podendo ser medidas em “ciclos por segundo”, no Sistema Internacional, Hertz (Hz). Esta medida é denominada de frequência.

O valor de frequência das ondas acústicas, serve de referência para classificação dos tipos de onda neste quesito, já que se baseiam na faixa de frequência sonora audível ao ser humano. Até 20 Hz, as ondas são classificadas como “infrassom”; de 20 Hz a 20 kHz é a faixa de frequência perceptível ao ouvido humano, denominando-se propriamente “som”; finalmente, acima de 20 kHz, classifica-se como “ultrassom” (ANDREUCCI, 2018).

2.2.1.2.2 *Velocidade de propagação*

Define-se velocidade de propagação como sendo a distância percorrida por uma onda em um intervalo de tempo. A velocidade de propagação de uma onda depende das propriedades do meio, e não das propriedades da onda, sendo assim, é um parâmetro constante e independente da frequência (ANDREUCCI, 2018).

2.2.1.2.3 *Comprimento de onda*

O comprimento de onda (λ) é a medida entre duas cristas ou entre dois vales. É possível determinar o comprimento de onda através da **equação (2-1)**, partindo da velocidade (V), parâmetro normalmente conhecido, visto que só depende das propriedades do meio de propagação; e da frequência (f), valor dado pela fonte emissora (ANDREUCCI, 2018):

$$V = \lambda \cdot f \quad (2-1)$$

2.2.1.2.4 *Amplitude*

Além da frequência, velocidade e comprimento de onda, a amplitude é também uma medida de onda importante e que serve também como referência para outros parâmetros como o nível de amplitude sonora (NAS) (ANDREUCCI, 2018).

A amplitude de onda é a medida de altura das cristas ou profundidade dos vales em relação ao ponto de equilíbrio. Pode ser definida também como a máxima perturbação no meio durante o ciclo (SIQUEIRA, 2016).

2.2.2 Geração e Recepção de Ondas Ultrassônicas

No ensaio de ultrassom, as ondas ultrassônicas são geradas a partir de transdutores, no entanto, existem diversos tipos de métodos de geração, como lista SANTIN (2003):

- Efeito piezométrico;
- Choques ou atritos mecânicos;

- Excitação térmica;
- Processos eletroestáticos;
- Processos eletrodinâmicos;
- Processos magnetostrictivos.

2.2.2.1 Efeito piezelétrico

É o método de geração de ondas ultrassônicas mais utilizado nos ensaios de ultrassom, por isso, será o único método abordado neste documento. O efeito piezelétrico tem como princípio a transformação de um tipo de energia em outro. Alguns cristais, quando deformados mecanicamente, geram espontaneamente uma corrente elétrica, e por outro lado, ao serem submetidos a uma corrente alternada, produzem vibrações mecânicas (SANTIN, 2003).

Por essa característica, os cristais piezelétricos são utilizados nos transdutores das inspeções por ultrassom, visto que podem emitir ondas ultrassônicas ao serem submetidos a uma corrente elétrica e podem decodificar o sinal de retorno convertendo as vibrações mecânicas em pulsos elétricos.

O cristal mais comumente utilizado é o cristal de quartzo, no entanto outros cristais podem ser utilizados como transdutores, como o sulfato de lítio e os materiais cerâmicos polarizados, dentre esses: titanato de bário, titanato zirconato de chumbo e o metaniobato de chumbo (ANDREUCCI, 2018).

2.2.2.2 O feixe ultrassônico

Para entender o comportamento do feixe ultrassônico, é necessário compreender o cristal piezelétrico, fonte geradora das ondas, como um grande grupo de fontes pontuais, onde esses pontos se encontram muito próximos (SANTIN, 2003).

Segundo o princípio de *Huygens*, uma fonte pontual irradia energia para todas as direções, produzindo um feixe em formato esférico com uma intensidade que decresce proporcionalmente ao quadrado da distância. No entanto, no caso de fontes pontuais muito próximas, como no cristal piezelétrico, ocorre a combinação das duas frentes de onda, perdendo assim seu formato esférico (SANTIN, 2003).

Sendo assim, é possível observar que nas proximidades do cristal, a interferência ondulatória é muito grande, todavia, essa interferência vai diminuindo conforme se distancia da fonte, até formar-se uma única frente de onda.

Esse fenômeno faz com que seja perceptível no feixe ultrassônico três regiões: campo próximo, zona de transição e campo distante (SIQUEIRA, 2016). A **Figura 2-3** ilustra o feixe ultrassônico e suas zonas.

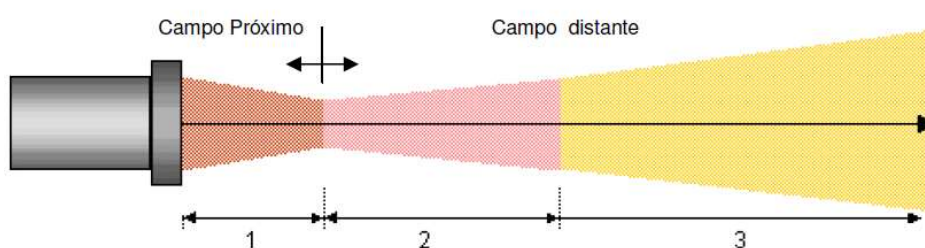


Figura 2-3: Ilustração de um feixe sônico distinguindo-se as zonas do feixe sônico (Adaptado de ANDREUCCI, 2018)

2.2.2.2.1 Campo próximo (zona de Fresnel)

O campo próximo é aquele que se encontra nas imediações do cristal piezelétrico, compreendendo a distância (N) entre o cristal e o ponto de pressão máxima do feixe sônico. Ele se caracteriza pela intensa variação de intensidade ondulatória causada pela interferência entre os feixes sônicos, como mencionado anteriormente (ANDREUCCI, 2018) (SANTIN, 2003).

Portanto, no que se refere à inspeção pelo método de ultrassom, no campo próximo há uma grande dificuldade de detecção de descontinuidades cujas dimensões são menores do que o diâmetro do transdutor, sendo assim um ponto de atenção para o inspetor (ANDREUCCI, 2018).

2.2.2.2.2 Zona de transição

É a zona compreendida entre o campo próximo e o campo distante, e normalmente se localiza entre $1N$ e $3N$ (SANTIN, 2003). Caracteriza-se pelo caráter variável do ângulo de divergência e pelo fato de que o decréscimo da pressão sônica ainda não ser proporcional ao inverso da distância (SIQUEIRA, 2016) (SANTIN, 2003).

Em termos práticos, nesta região é possível detectar descontinuidades maiores (ANDREUCCI, 2018).

2.2.2.2.3 *Campo distante (zona de Fraunhofer)*

Já no campo distante, já não se observa a variação de pressão sônica causada pela interferência. Desta forma, a pressão sônica no feixe central decai proporcionalmente com o inverso da distância, enquanto o feixe diverge com um ângulo de divergência constante (SIQUEIRA, 2016) (SANTIN, 2003). Na zona de *Fraunhofer*, qualquer descontinuidade compatível com o comprimento de onda pode ser detectada no ensaio de ultrassom (SANTIN, 2003).

2.2.2.3 Atenuação

Ao percorrer o material, a onda ultrassônica sofre consideráveis perdas de energia, e, conseqüentemente, a intensidade de onda recebida pelo transdutor é inferior à emitida por ele (SANTIN, 2003).

Esta queda de intensidade pode se dar por perdas de transmissão, efeitos de interferência e dispersão do feixe (SIQUEIRA, 2016)(SANTIN, 2003). Essa queda ocorre, principalmente, quando o feixe sônico encontra obstáculos, que normalmente são defeitos, contornos de grão, discordâncias, entre outros (TOOZANDEHJANI, 2015).

2.2.2.3.1 *Perdas de transmissão*

Pode ocorrer como efeito da impedância acústica, principalmente na inspeção de materiais compostos ou na inspeção por imersão, onde há diferença de impedância entre as interfaces. Por conta dessa diferença, parte da energia é refletida e outra é transmitida (SANTIN, 2003).

Outra forma de perda de transmissão é a por absorção, gerada principalmente na transformação de energia mecânica em energia térmica decorrente do movimento oscilatório das partículas atômicas no meio, aquecendo e resfriando o material de forma alternada. Esse fenômeno atua como uma espécie de frenagem do sistema

ondulatório especialmente em altas frequências, onde a troca de calor é mais intensa. Assim, conclui-se que a perda por absorção é diretamente proporcional ao aumento da frequência (SANTIN, 2003).

Por último, a perda de transmissão pode ser decorrente do espalhamento de uma onda ultrassônica, que se dá pela falta de homogeneidade do material que compõe o meio de propagação (SANTIN, 2003).

2.2.2.3.2 Efeitos de interferência

A perda de energia como sendo efeito de uma interferência, se deve ao fenômeno físico da difração. Um feixe de onda que se propaga em um meio homogêneo vibra de forma coerente, obedecendo um mesmo padrão vibratório. No entanto, ao se deparar com uma descontinuidade, seja ela um poro ou uma inclusão por exemplo, ocorre uma perturbação do padrão de oscilação da onda, alternando os picos de máxima e mínima intensidade, mas ao passar por esta descontinuidade, o feixe volta a ser coerente (SANTIN, 2003).

2.2.2.3.3 Dispersão do feixe

A perda de intensidade da onda sonora também se dá pela dispersão do próprio feixe. Como mencionado na seção 2.2.2.2, o feixe ultrassônico possui três regiões que se comportam de formas particulares quanto a intensidade.

Na região do campo próximo há uma intensa variação de intensidade decorrente da interferência entre os feixes emitidos pelas diversas fontes pontuais do cristal piezelétrico; mais adiante a intensidade começa a aos poucos a decair proporcionalmente ao inverso do quadrado da distância (SANTIN, 2003). Ademais, a intensidade varia de acordo com a divergência do feixe, decaindo à medida que se afasta do eixo central do feixe sônico (ANDREUCCI, 2018).

2.2.2.4 Transdutores

Transdutores são os cabeçotes pelos quais se dá a emissão e a captação dos sinais ultrassônicos, é nele que está acoplado o cristal piezelétrico. Em uma inspeção

por ultrassom, o transdutor emite um pulso ultrassônico, que por sua vez atravessa toda a peça inspecionada (meio de propagação) de tal sorte que, ao encontrar uma interface, ou seja, alguma descontinuidade, reflete o sinal (eco) de retorno ao transdutor que, por sua vez, gera o sinal elétrico correspondente (ANDREUCCI, 2018).

Os transdutores são compostos por uma carcaça, um cristal piezelétrico, um bloco amortecedor, uma face protetora e pelos conectores elétricos. Os transdutores podem conter mais de um cristal piezelétrico, dividindo as funções de emissão e recepção do sinal (ANDREUCCI, 2018). Existem diversos tipos de transdutores, os quais serão detalhados a seguir.

2.2.2.4.1 Transdutor normal

São assim denominados pela incidência normal, isto é, perpendicular à peça ensaiada, do sinal ultrassônico. Esses transdutores atuam a partir do contato direto com o material e são monocristais, ou seja, possuem apenas um cristal fazendo a emissão e recepção do sinal sônico, conforme mostrado na **Figura 2-4** (ANDREUCCI, 2018).

Por essas características, são mais comumente utilizados em peças com faces paralelas, onde se deseja descobrir descontinuidades na direção perpendicular à face da peça, como por exemplo em chapas, fundidos e forjados. Vale ressaltar que os transdutores normais não são os ideais para detectar as descontinuidades orientadas perpendicularmente à superfície do material a ser ensaiado, tendo em vista que o caráter normal da incidência não permite que o sinal de retorno forneça informações precisas sobre o tamanho e a direção das descontinuidades com a mesma orientação que o sinal ultrassônico (SANTIN, 2003).

Os transdutores normais têm inúmeras aplicações na indústria, mas possuem a desvantagem de o pulso inicial ser sempre mostrado na tela do equipamento de inspeção, desta forma, as descontinuidades presentes na proximidade do cristal não são detectadas (SANTIN, 2003).

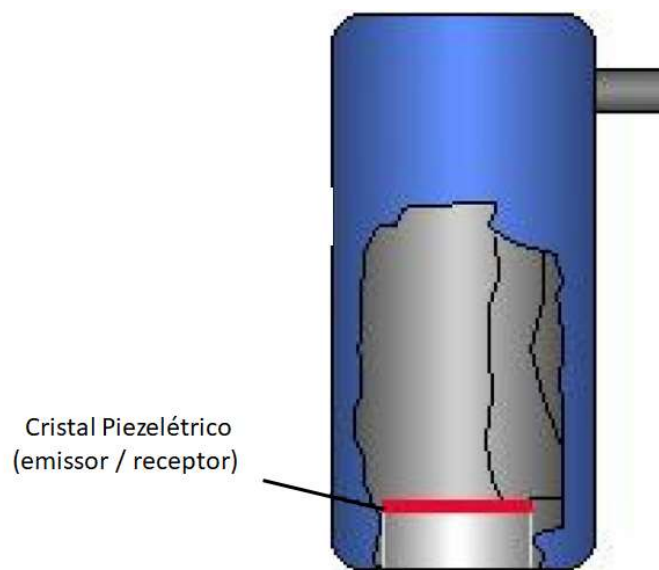


Figura 2-4 : Transdutor normal ou reto (Adaptado de ANDREUCCI, 2018)

2.2.2.4.2 *Transdutor angular*

São assim denominados pois possuem uma angulação em relação à superfície da peça a ser ensaiada, sendo ideais, portanto, para detectar descontinuidades orientadas perpendicularmente à face do corpo de prova (ANDREUCCI, 2018).

Possuem, portanto, uma incidência angular do sinal sônico e são monocristais, como pode ser visto na **Figura 2-5**, sendo igualmente utilizados com contato direto com o material a ser ensaiado.

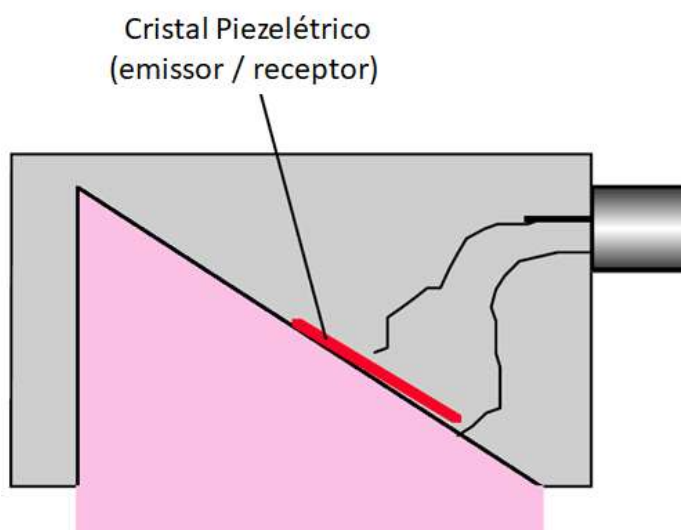


Figura 2-5 : Transdutor angular (Adaptado de ANDREUCCI, 2013)

Assim como os transdutores normais, possuem dificuldades de detectar descontinuidades nas proximidades do cristal, por conta da zona morta. No entanto, este efeito é atenuado com a utilização da sapata acrílica, que retarda a entrada do eco na peça (SANTIN, 2003). O transdutor angular é muito utilizado na inspeção de soldas.

2.2.2.4.3 *Transdutor duplo-cristal*

São dotados de dois cristais piezoeletricos que atuam separadamente, um como emissor do sinal ultrassônico e outro como receptor, conforme **Figura 2-6**. Desta forma, é possível detectar aquelas descontinuidades localizadas na zona morta. Isso ocorre porque as vibrações residuais no cristal após a emissão do pulso sônico, responsáveis pelo pulso inicial e pela zona morta, não são captadas pelo receptor, visto que, neste caso, ele se encontra isolado elétrica e acusticamente (SANTIN, 2003) (ANDREUCCI, 2018).

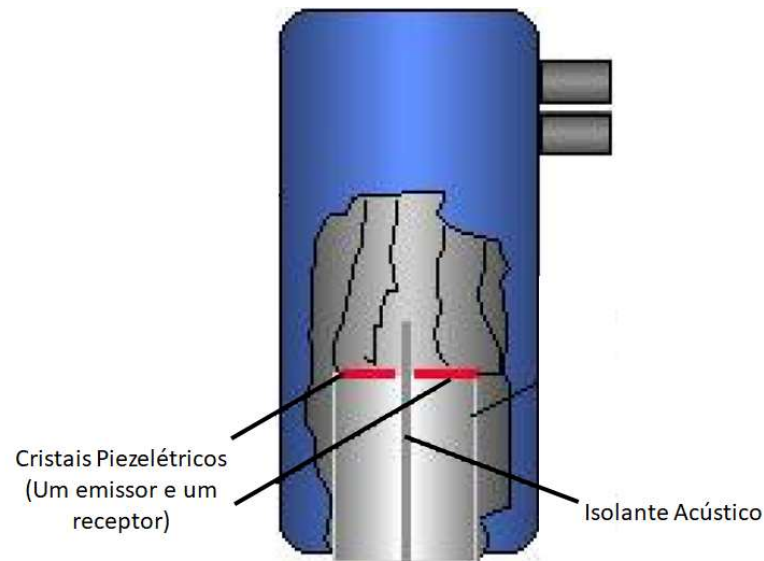


Figura 2-6 : Transdutor duplo cristal (Adaptado de ANDREUCCI, 2018)

Assim, os transdutores duplo-cristal são ideais para inspeção em peças que possuem espessura reduzida ou quando se deseja detectar descontinuidades na proximidade da superfície. São muito utilizados também na medição de espessuras, na detecção de corrosão, na detecção, localização e avaliação de descontinuidades e na medição de grandes descontinuidades (SANTIN, 2003).

2.2.2.4.4 *Transdutor phased array*

É um tipo de transdutor especial onde, ao invés de um ou dois cristais, como representa esquematicamente a **Figura 2-7**, se encontram entre 10 a 256 pequenos cristais arranjados no cabeçote (ANDREUCCI, 2018).

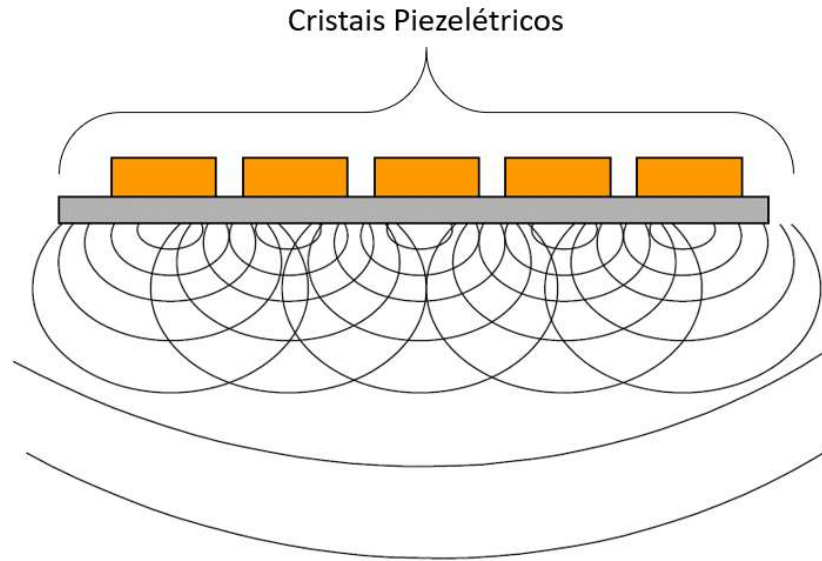


Figura 2-7 : Transdutor Phased Array (Adaptado de ANDREUCCI, 2018)

Desta forma é possível modificar o comportamento do feixe ultrassônico durante a inspeção, de forma que os cristais, operando em fase ou defasado, consigam alterar o ângulo de incidência do sinal sônico em uma mesma varredura, sendo possível inspecionar a peça com ângulos diferentes, já que essa alteração é feita eletronicamente, não sendo necessário nenhuma alteração na montagem do aparelho ou troca do cabeçote (ANDREUCCI, 2018). Segundo ANDREUCCI, 2018, os transdutores *phased array* possuem as seguintes vantagens:

- Variedade de pontos focais para um mesmo transdutor;
- Variedade de ângulos de incidência para um mesmo transdutor;
- Varredura do material de forma eletrônica do feixe sônico;
- Variedade dos modos de inspeção;
- Maior flexibilidade para inspeção de juntas complexas.

2.2.2.4.5 Transdutor de imersão

São utilizados nas inspeções por imersão e são muito semelhantes ao funcionamento dos transdutores normais. Se diferenciam, pois como são utilizados imersos ou parcialmente imersos, são projetados com estanqueidade suficiente para que não haja dano ao equipamento e as conexões elétricas (SANTIN, 2003).

2.2.3 Métodos de Inspeção por Ultrassom

Os ensaios de ultrassom ocorrem, principalmente, por dois métodos: o método de pulso eco, sendo esse o mais comumente aplicado, e o método da transparência. Esses dois métodos serão explicados com mais detalhes a seguir:

2.2.3.1 Pulso eco

É o método mais utilizado, pois é de simples execução e exige poucos equipamentos, já que se utiliza de apenas um transdutor, atuando em apenas uma das faces da peça a ser ensaiada. Neste caso, um único cabeçote acumula as funções de emissor e receptor do sinal ultrassônico (SANTIN, 2003).

Nesta técnica, o transdutor transmite para a peça pulsos ultrassônicos em intervalos regulares de tempo. Quando a energia sônica transmitida nesses pulsos encontra alguma interferência, parte dela (ou em sua totalidade) é refletida e retorna ao transdutor. Este, por sua vez, transmite um sinal elétrico que é decodificado e apresentado na tela do aparelho, indicando a quantidade de energia refletida e o tempo decorrido, sendo impossível inferir o tamanho da descontinuidade, sua profundidade e localização através do ensaio. A **Figura 2-8** ilustra o método de ensaio pulso eco (ANDREUCCI, 2018).

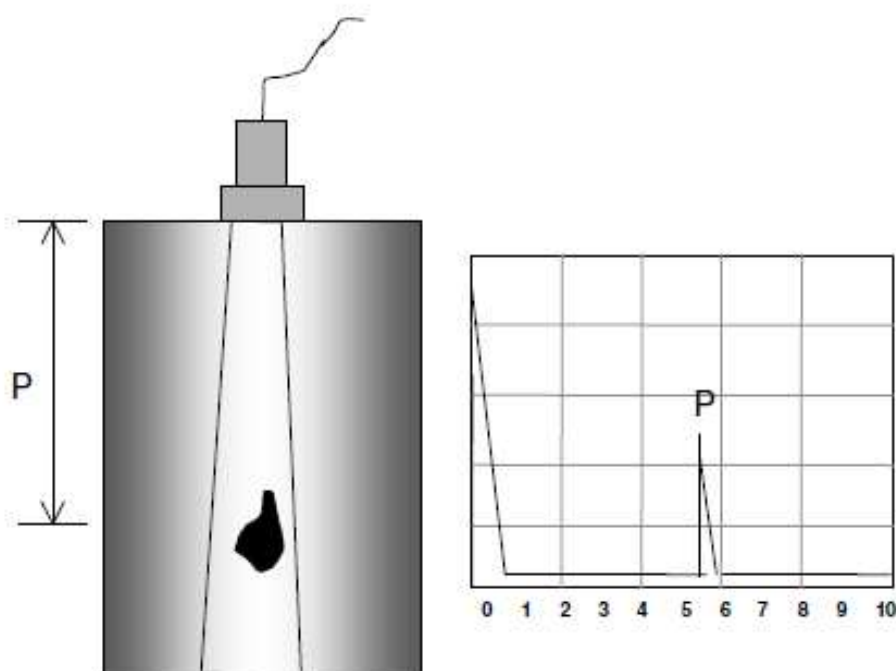


Figura 2-8: Esquemático da detecção de microfissuras através da técnica Pulso Eco de ensaio de ultrassom (ANDREUCCI, 2018)

2.2.3.2 Transparência

Diferentemente do método pulso eco, esta técnica de ultrassom utiliza dois transdutores que atuam separadamente, posicionados em duas faces opostas da peça a ser ensaiada.

O princípio de funcionamento é semelhante ao método pulso eco, no entanto, neste caso, um dos transdutores emite os sinais sônicos em um dos lados da peça, enquanto o outro recebe esses sinais. Ao se deparar com alguma descontinuidade, parte do sinal emitido é refletido, e assim, o transdutor responsável pela captação, receberá uma quantidade de energia menor do que a emitida. Caso a peça não apresente descontinuidades, toda a energia emitida é recebida (SANTIN, 2003).

Dessa forma, não é possível detectar a profundidade das descontinuidades, sendo possível apenas detectar sua presença e verificar a amplitude do sinal recebido na tela do equipamento (SANTIN, 2003).

A principal aplicação do método de ensaio de ultrassom por transparência, é na inspeção de chapas, podendo ser também utilizado em juntas soldadas e barras forjadas ou fundidas. Esse ensaio tem como objetivo, estabelecer um critério

comparativo levando em conta a amplitude do sinal apresentado na tela (ANDREUCCI, 2018).

2.2.3.3 Teste por contato e teste por imersão

Além dos dois métodos de ensaio apresentados anteriormente, existem duas técnicas de ensaio em relação à disposição da peça com o transdutor: o teste por contato e o teste por imersão. Ambos podem ser utilizados tanto no método pulso eco quanto no método da transparência.

2.2.3.3.1 *Teste por contato*

Esta técnica é a mais simples e a mais comumente utilizada nos ensaios de ultrassom. No teste por contato, a inspeção é realizada aplicando-se uma leve pressão com um transdutor sobre a peça, havendo um contato entre as partes, intermediado por um acoplante (ANDREUCCI, 2018) (SANTIN, 2003).

O acoplante é uma fina camada de uma substância líquida ou pastosa – podendo ser: água, óleo, glicerina, graxas derivadas do petróleo, graxas de silicone, entre outros – colocada entre o transdutor e a peça com o objetivo de eliminar a presença de ar entre os elementos. O ar é indesejável em um ensaio de ultrassom pois é um mau transmissor sônico e possui uma grande diferença de impedância com a maioria dos materiais sólidos, causando assim, prejuízo ao ensaio (SANTIN, 2003).

2.2.3.3.2 *Teste por imersão*

Já nesta técnica, o transdutor não entra em contato com a peça. Neste caso, o material a ser ensaiado e o cabeçote se encontram imersos em um líquido, sendo este usualmente água (SANTIN, 2003) (ANDREUCCI, 2018).

O teste por imersão mais comumente realizado, utiliza-se de apenas um cabeçote com incidência normal à peça, mas alterando a posição do transdutor é possível realizar o teste tanto com ondas longitudinais como com ondas transversais. No caso do teste realizado por incidência normal, as ondas longitudinais são transmitidas para a peça através da coluna d'água, esta que deve ser corretamente

dimensionada, de forma que os ecos da coluna não mascarem eventuais ecos de descontinuidades ou não haja nenhuma rejeição imprópria por parte do material (SANTIN, 2003).

Velocidade de inspeção, fácil automatização e facilidade de controlar e direcionar o feixe sônico, são vantagens oferecidas pelo teste de imersão. No entanto, esse teste também apresenta limitações quanto ao custo dos equipamentos e à possibilidade de perdas de energia ocasionadas pelo mau dimensionamento da coluna d'água (SANTIN, 2003).

2.2.4 Aparelhagem

O equipamento de ultrassom possui um conjunto de circuitos eletrônicos que têm como objetivo transmitir ao cristal piezelétrico uma série de pulsos elétricos que serão por ele convertidos em sinais ultrassônicos.

Para que isso ocorra, o aparelho de ensaio por ultrassom é normalmente composto por: fonte de energia, temporizador eletrônico, circuito gerador de pulsos, circuito receptor (amplificador), circuito de varredura e mostrador de sinais (ANDREUCCI, 2018) (SANTIN, 2003).

Na execução de um ensaio pelo método pulso eco, por exemplo, o temporizador eletrônico aciona o circuito gerador de pulsos em intervalos de tempo bem definidos, este, por sua vez, envia ao transdutor um pulso elétrico. Simultaneamente o temporizador aciona o circuito de varredura - responsável pela medição do tempo - que está conectado ao mostrador de sinais.

Tendo recebido o pulso elétrico, o transdutor, através do cristal piezelétrico, o converte em pulso sônico. Esse pulso gerado é transmitido para a peça através de um acoplante. Ao encontrar alguma descontinuidade, o sinal ultrassônico é refletido e retorna ao transdutor, que desta vez transforma o pulso sônico em pulso elétrico que retorna ao aparelho. Esta voltagem, que é induzida a partir da vibração do cristal piezelétrico em contato com o sinal ultrassônico de retorno, é amplificada pelo circuito receptor e exibida no mostrador de sinais que indicará o tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal (SANTIN, 2003).

2.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL POR MEIO DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS

O conhecimento das propriedades de um material é parte fundamental em qualquer projeto de engenharia, seja no desenvolvimento de um produto, em uma construção civil, na elaboração de uma máquina, na fabricação de uma peça, entre outros. É através da avaliação de suas características que um determinado material é selecionado para uma aplicação específica, verificando se suas propriedades atendem aos esforços que lhe serão aplicados.

As propriedades dos materiais podem derivar de suas características mecânicas ou de suas características microestruturais. Elas são fruto de quatro características metalúrgicas que lhe serão determinantes e ditarão suas medidas, são elas: composição química, microestrutura, estrutura cristalina e densidade de discordâncias (NANEKAR *et. al*, 2004).

Os métodos convencionais utilizados para conhecer as propriedades de um material são em quase sua totalidade destrutivos, ou seja, após sua realização, a peça analisada não tem mais utilidade e é descartada. Além disso, são em geral mais caros, lentos e de difícil automação (FREITAS, 2013).

Esses métodos normalmente envolvem amostragem, o que é um fator de incerteza, já que se parte da premissa de que a amostra retirada do material é um representante genuíno do material como um todo que entrará em operação. Um teste realizado diretamente na peça que será colocada em serviço é mais confiável e fornece resultados mais compatíveis com a realidade operacional (NANEKAR *et. al*, 2004).

As técnicas convencionais de caracterização microestrutural envolvem preparo de amostras que, além das ressalvas citadas no parágrafo anterior, envolvem processos como corte, lixamento, polimento, embutimento e ataque químico, o que denota o caráter destrutivo do ensaio.

Os métodos de caracterização das propriedades mecânicas, também envolvem amostragem e são destrutivos. Alguns exemplos são: ensaio de tração, ensaio de dureza, ensaio *charpy*, entre outros.

Outro fator preponderante, que se apresenta em detrimento dos métodos convencionais, é o fato de esses não serem realizados enquanto o material está em operação (FREITAS, 2013). Entretanto, existem inúmeros esforços - temperatura,

pressão, vibração, tração, compressão, fadiga, entre outros - que ocorrem às peças enquanto elas estão em serviço que podem alterar as características do material e assim comprometer o componente.

Portanto, em razão das limitações apontadas anteriormente, é cada vez mais recorrente a utilização de métodos não destrutivos como alternativa para a caracterização das propriedades microestruturais e mecânicas. Estas técnicas oferecem resultados satisfatórios tanto na fase de fabricação quanto na fase operacional, sendo, portanto, mais versáteis e oferecendo um menor custo (FREITAS, 2013).

São exemplos de técnicas não destrutivas para a caracterização das propriedades dos materiais: ultrassom, correntes parasitas, partícula magnética, ruído magnético de *Barkhalsen*, radiometria, espectroscopia de *Mossabuer* etc (FREITAS, 2013). O método não destrutivo mais utilizado e que também será tratado neste trabalho, é a técnica de ultrassom.

O ultrassom possui algumas vantagens no âmbito do conhecimento das propriedades dos materiais, tais como: pode ser realizado em uma peça em serviço, é um método não destrutivo, é uma técnica de simples execução, possibilita a análise de uma parte do material, oferece resultados com grande grau de confiança, os parâmetros de teste ultrassônico são sensíveis às mudanças de microestrutura e propriedade da peça ensaiada, facilitando assim a caracterização (FREITAS, 2013).

Esses parâmetros de teste, podem ser relacionados à algumas propriedades metalúrgicas, como por exemplo: tamanho do grão, módulo de elasticidade, dureza, resistência à fratura, limite de escoamento, resistência a tração, entre outros (NANEKAR *et. al*, 2004) (FREITAS, 2013). É possível, por exemplo, determinar as constantes elásticas de um material através da velocidade de propagação das ondas que interagem com a estrutura cristalina (KUMAR, 2018) (KUMAR *et. al*, 2003).

2.3.1 Parâmetros de Teste Ultrassônico Para a Caracterização dos Materiais

Nesta seção, serão listados alguns dos parâmetros do teste de ultrassom que são correlacionados com as propriedades dos materiais para sua caracterização. Através deles, é possível estimar, prever e avaliar as propriedades mecânicas de um material, partindo dos resultados obtidos na inspeção ultrassônica.

2.3.1.1 Velocidade

A medição da velocidade ultrassônica tem sido muito utilizada como ferramenta de caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas dos materiais. Segundo KUMAR (2018), as medições de velocidade ultrassônica têm dois objetivos principais: avaliar as propriedades elásticas e desenvolver uma metodologia para a avaliação não destrutiva dos materiais.

Como definido no item 2.2.1.2.2, a velocidade é determinada a partir da divisão da distância percorrida pela onda ultrassônica (espessura da peça) pelo tempo decorrido entre a emissão do sinal e o seu retorno à superfície (TOF – *time of flight*), como demonstrado pela **equação (2-2)** (KUMAR, 2018).

$$V = \frac{2.t}{\text{TOF}} \quad (2-2)$$

Onde, “V” corresponde a velocidade ultrassônica; “t” representa a espessura do material ensaiado; e “TOF”, como mencionado é anteriormente, é o *time of flight*. No entanto, nem sempre é possível obter com precisão a medida de espessura de uma peça em uma situação de serviço, pois nem sempre se tem acesso fácil às duas superfícies do material. Nesses casos, a relação entre as velocidades longitudinal e transversal serve como um parâmetro útil, já que não é necessário conhecer a espessura da peça para se obter essa razão, como fica demonstrado na **equação (2-3)** (KUMAR, 2018).

$$R_{uv} = \frac{V_T}{V_L} = \frac{2.t/\text{TOF}_T}{2.t/\text{TOF}_L} = \frac{\text{TOF}_T}{\text{TOF}_L} \quad (2-3)$$

Através dos parâmetros de velocidade transversal e longitudinal, bem como a razão entre elas, é possível determinar com alta precisão as propriedades elásticas do material, como por exemplo o coeficiente de *Poisson* através da **equação (2-4)** (KUMAR, 2018).

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} = \frac{1 - 2R_{uv}^2}{2(1 - R_{uv}^2)} \quad (2-4)$$

É possível concluir pela equação acima, que a razão de velocidade ultrassônica varia inversamente ao coeficiente de Poisson, sendo assim, quanto maior for o coeficiente de Poisson em um determinado material, menor será a relação entre as velocidades ultrassônicas.

De acordo com KUMAR (2018), uma outra relação entre grandezas consiste na relação inversamente proporcional entre o coeficiente de Poisson e a velocidade de onda de cisalhamento (transversal) em materiais isotrópicos, ou seja, foi observado em seus estudos que o coeficiente de Poisson decresce com o aumento da velocidade de onda transversal. Isso implica que a relação entre R_{UV} e as velocidades ultrassônicas é diretamente proporcional, enquanto a relação entre R_{UV} e o coeficiente de Poisson é inversamente proporcional.

No entanto, KUMAR (2018) pontua que em materiais onde se encontram vazios, micro trincas ou aplicação de pressão/tensão, a relação entre R_{UV} e as velocidades ultrassônicas pode ser inversamente proporcional.

Com isso, pode-se concluir que a razão de velocidade (R_{UV}), é um parâmetro útil para realizar a caracterização de materiais pelo método ultrassônico em aplicações em campo, especialmente onde não se pode determinar a espessura do material ensaiado.

2.3.1.2 Atenuação

A atenuação é a medida da diminuição da amplitude de dois ecos de fundo consecutivos uma onda ultrassônica, ou seja, está diretamente associada à perda de energia. A perda de energia da onda sônica ao passar por um material, é resultado de dois fenômenos: absorção e dispersão (NANEKAR *et. al*, 2004).

A atenuação causada pela absorção é causada por mecanismos como o amortecimento, histerese e efeitos termo elásticos. Já a perda de energia por dispersão depende da relação entre tamanho de grão e comprimento de onda (NANEKAR *et. al*, 2004).

Através da medição da atenuação, é possível realizar a caracterização das propriedades dos materiais para a determinação do tamanho de grão, da presença de

fase secundária na microestrutura, inclusões e porosidades e distribuição de descontinuidades difusas (NANEKAR *et. al*, 2004).

Segundo NANEKAR (2004), o coeficiente de atenuação é medido através da diferença de amplitude (dB) entre dois ecos de fundo consecutivos, divididos pelo percurso total percorrido pelo sinal. Sua medida é expressa em dB/mm.

2.3.1.3 Amplitude

Os sinais refletidos ao encontrar interferências, carregam consigo informações sobre sua natureza e dimensões. A medida de amplitude dessas ondas dispersas são parâmetros úteis na caracterização dos materiais (NANEKAR *et. al*, 2004).

Essa medida pode ser relacionada ao tamanho de grão e a presença de partículas de fase secundária, além de permitir a detecção de descontinuidades e micro trincas (NANEKAR *et. al*, 2004).

2.3.1.4 Análise espectral

A partir dos ecos de fundo – ondas refletidas ao encontrar a outra extremidade da peça ensaiada – é possível através da *Transformada de Fourier*, obter a distribuição de energia em diferentes valores de frequência, ou seja, o espectro de frequências (NANEKAR *et. al*, 2004).

Um dos parâmetros utilizados para a caracterização das propriedades dos materiais através da análise espectral é a frequência. Pode-se citar como exemplo, a atenuação da frequência de onda causada pela alteração das propriedades dentro da peça, o que ocasiona em uma mudança no espectro (NANEKAR *et. al*, 2004). Assim, é possível correlacionar as alterações espectrais às mudanças nas propriedades dos materiais.

2.3.1.5 Ângulo crítico

O ângulo crítico também é um parâmetro que pode ser utilizado para a caracterização de materiais através da medição da refração das ondas transversais e longitudinais (NANEKAR *et. al*, 2004).

Os ângulos críticos podem ser medidos com precisão através de goniômetros e são muito sensíveis às variações de propriedades de superfície (NANEKAR *et. al*, 2004).

2.3.2 Medidas da Caracterização dos Materiais por Medidas Ultrassônicas

Através da combinação dos parâmetros mencionados na seção anterior, é possível determinar, através dos parâmetros obtidos em um ensaio de ultrassom, uma série de propriedades como: Módulo de Young, dureza, resistência ao escoamento e resistência a fratura. Nesta seção serão tratados algumas dessas medidas e estimativas de caracterização microestrutural e mecânica que são realizadas por meio da técnica de ultrassom.

2.3.2.1 Medição de tamanho de grão

Tamanho de grão é uma característica morfológica microestrutural muito importante nos materiais, pois influencia diretamente em determinadas propriedades mecânicas, como: ductilidade, dureza, tenacidade e resistência a fatura.

A determinação do tamanho de grão por método ultrassônico se dá através da medição do coeficiente de dispersão, que varia com a frequência de onda e com o tamanho de grão (NANEKAR *et. al*, 2004).

É possível se obter o dado desejado através da obtenção de curvas de calibração entre os coeficientes de dispersão e tamanhos de grãos conhecidos, variando os valores de frequência, a partir disso, é possível estimar um tamanho de grão desconhecido em um determinado valor de frequência (NANEKAR *et. al*, 2004).

2.3.2.2 Identificação de inclusões não metálicas

Um dos fatores que podem causar falhas em equipamentos metálicos, sobretudo em aços, são as inclusões de elementos não metálicos em sua matriz microestrutural. Esses elementos podem causar diversos problemas nos materiais, como: fragilização, redução da resistência a fadiga, mau acabamento superficial, predisposição a corrosão, entre outros.

São exemplos desses elementos: sulfetos, alumina, silicatos e óxidos.

É possível detectar inclusões não metálicas através do ensaio de ultrassom por imersão, utilizando-se um transdutor de 5 a 10 MHz. O sinal, que é refletido ao se deparar com essas inclusões, fornece informações sobre a natureza, tamanho e profundidade do elemento (NANEKAR *et. al*, 2004).

2.3.2.3 Determinação do módulo de elasticidade

Assim como na seção 2.3.1.1 foi apresentado uma relação matemática entre o coeficiente de *Poisson* e as velocidades transversais e longitudinais da onda ultrassônica, pode-se também relacionar as velocidades com o módulo de *Young* através da **equação (2-5)** (NANEKAR *et. al*, 2004) (KUMAR, 2018):

$$E = \frac{\rho \cdot V_T^2 \cdot (3V_L^2 - 4V_T^2)}{(V_L^2 - V_T^2)} \quad (2-5)$$

Através da **equação (2-5)**, é possível determinar o módulo de elasticidade do material utilizando-se de parâmetros resultantes do ensaio de ultrassom, nesse caso, as velocidades transversais e longitudinais.

2.3.2.4 Estimativa de dureza

Dureza é outra propriedade que pode ser relacionada com medidas ultrassônicas. Isso se dá pelo fato de observar-se uma variação da velocidade e da atenuação associados a diferentes valores de dureza (NANEKAR *et. al*, 2004).

As medições de velocidade e atenuação são muito úteis para a determinação de inúmeras propriedades além das já mencionadas nesse documento, como por exemplo a estimativa de resistência mecânica e resistência à fratura (NANEKAR *et. al*, 2004).

2.3.2.5 Monitoramento da temperatura de transição dúctil frágil

A temperatura de transição dúctil frágil representa a temperatura abaixo da qual o componente é susceptível a uma fratura frágil. Um dos fatores que influencia neste parâmetro é o tamanho de grão, uma vez que quanto maior for o grão, maior será a temperatura de transição (NANEKAR *et. al*, 2004).

Considerando também que quanto maior o tamanho de grão, maior a atenuação, pode-se utilizar esse parâmetro ultrassônico para determinar a temperatura de transição dúctil frágil (NANEKAR *et. al*, 2004).

2.4 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Os aços de alta resistência e baixa liga, conhecidos no mercado pelas siglas ARBL ou HSLA (*High Stength Low Alloy*), combinam um elevado limite de resistência e tenacidade, ocasionados pela adição de determinados elementos de liga, e foram desenvolvidos para atender as demandas da indústria do óleo e gás. (SILVA, 2020) (OLIVEIRA, 2013)

Por conta dos seus baixos teores de carbono, os aços ARBL apresentam boa soldabilidade. Como em sua concepção tinha-se em vista a aplicação em equipamentos e estruturas do setor offshore, são produzidos com maior ênfase nas propriedades mecânicas que na composição química, de forma que sua composição visa proporcionar valores mais adequados de propriedades mecânicas (COSTA,2011).

Entretanto, esses aços são classificados como baixa liga, pois, seus teores de elementos de liga são muito inferiores aos aços de alta liga, como os aços inoxidáveis e os aços ferramenta, por exemplo. São produzidos com limite de escoamento na faixa de 290 a 550 MPa e resistência a tração entre 415 e 700 MPa (COSTA,2011).

Em geral, os aços ARBL contêm perlita e ferrita na sua constituição microestrutural, mas também é possível encontrar ferrita bainítica, martensita revenida ou bainita (PICKERING, 1978).

2.4.1 Aços API

Os aços grau API são, como mencionado na introdução desse trabalho, são empregados na fabricação de dutos de transporte de óleo e gás e outros equipamentos, como conectores e flanges.

Os equipamentos e dutos utilizados nesse tipo de aplicação, são submetidos a grande pressão interna, devido à alta pressão que os fluidos escoam pela tubulação, visto que estavam outrora aprisionados sob altíssima pressão nos poços de petróleo.

Nos casos dos dutos e conectores submarinos, esses também sofrem grande influência de pressão externa, proveniente da coluna d'água existente sobre eles. Em um primeiro momento, pode não parecer trivial, mas existem campos de exploração e petróleo a lâminas d'água de 3 mil metros, o que corresponde a altíssimos valores de pressão.

Devido aos esforços sofridos pelos tubos, exige-se que os seus materiais sejam de elevada resistência mecânica e suportem elevadas pressões. Assim, a *American Petroleum Institute* (API) regulamenta e especifica a fabricação desses tubos e equipamentos através de normas como a API 5L e API 6A.

De acordo com as recomendações da norma API 5L, os aços são identificados de acordo com o valor do seu limite de escoamento, como por exemplo os aços API X80 e API X65 tem valores de escoamento na ordem de 80 ksi e 65 ksi, respectivamente (API Specification 5L, 2012).

A letra que precede os valores de escoamento, variam entre A, B ou X, de tal sorte que a letra X, indica que o aço utilizado na fabricação daquele tubo é de alta resistência (API Specification 5L, 2012).

Vale ressaltar que apenas a partir do grau X42 os aços API 5L passaram a ser de alta resistência e baixa liga (ARBL), anteriormente os tubos eram fabricados com aço carbono endurecido por adição de carbono e manganês, o que causava perdas significativas nos valores de tenacidade e soldabilidade (JUNIOR *et. al*, 2013).

Os aços de alta resistência e baixa liga apresentam melhores valores de tenacidade, conservando uma boa relação com os valores de resistência mecânica. Isso se dá através da adição de elementos de liga (JUNIOR *et. al*, 2013).

Os aços ARBL apresentam baixo teor de carbono para a mesma resistência mecânica, o que influencia positivamente na soldabilidade, facilitando a fabricação dos tubos. Outra vantagem desses aços são os valores de limite de escoamento, que são superiores aos aços anteriormente produzidos e possuem valores acima de 40 ksi (JUNIOR *et. al*, 2013).

Devido às características de maior resistência mecânica e tenacidade, os aços de alta resistência e baixa liga permite a fabricação de tubos de menor espessura de parede, gerando ganhos em relação a custo e peso (JUNIOR *et. al*, 2013).

2.4.2 Aço 8630

Conforme mencionado na introdução desse trabalho, o aço AISI 8630 é largamente aplicado na indústria do óleo e gás, pois oferece condições balanceadas de resistência mecânica e tenacidade, além de atender requisitos mecânicos para fabricação de componentes para esse tipo de aplicação, atendendo a normas como a NACE MR0175 (OLIVEIRA, 2013) (SILVA,2020).

O aço em sua versão modificada, ou seja, acrescido de elementos de liga refinadores de grão, é muito utilizado em juntas dissimilares, em conjunto com o aço ASTM A182 F22, por exemplo (OLIVEIRA,2013). É também utilizado combinado revestido com Inconel 625 em estruturas que entram em contato com fluidos de produção, ricos em H_2S , para proteção anticorrosiva (DAÍ,2018).

2.4.2.1 Composição química

O aço AISI 8630 é um aço de baixa liga, que contém de 0,25 a 0,33 % de carbono, contendo elementos de liga como o manganês, silício, fósforo, molibdênio cromo, níquel e enxofre (SILVA, 2020). Podendo-se adicionar ainda elementos como: vanádio, titânio e nióbio, de forma a garantir um limite de escoamento na ordem de 560 MPa e uma temperatura de transição dúctil frágil para o ensaio de impacto Charpy de -60°C (ASM Metals Handbook, 1994). Os aços que recebem em sua composição

elementos de liga adicionais comparado ao 8630 comum, são denominados AISI 8630 modificados (AISI 8630M). Cada um desses elementos de liga, tem por objetivo agregar ao aço uma propriedade mecânica desejada para determinado tipo de aplicação.

O vanádio, titânio e nióbio são acrescentados normalmente como formadores de precipitados, para que os carbetos de nitretos por eles formados inibam o movimento dos contornos de grãos durante o tratamento térmico, atuando assim como refinadores de grão da microestrutura; o molibdênio, aumenta a resistência mecânica em altas temperaturas; o vanádio melhora a tenacidade, aumenta a tensão e ruptura bem como a dureza do aço. Em geral, a adição de elementos de liga no aço 8630, possibilita uma microestrutura mais refinada e uma combinação adequada de resistência mecânica e tenacidade (CANTARIN,2011). A **Tabela 2-1** a seguir apresenta uma comparação entre a composição química do aço AISI 8630 comum e o aço AISI 8630 modificado:

Tabela 2-1 : Composição química dos aços AISI 8630 comum e AISI 8630 modificado (Adaptado de CANTARIN, 2011)

Composição Química	AISI 8630 comum	AISI 8630 modificado
%C	0,280 – 0,330	0,280 – 0,430
%Mn	0,700 – 0,900	0,750 – 0,950
%Si	0,150 – 0,300	0,150 – 0,350
%Ni	0,400 – 0,700	0,700 – 0,900
%Cr	0,400 – 0,600	0,800 – 1,000
%Mo	0,150 – 0,250	0,350 – 0,450
%P	0,035 máx	0,025 máx
%S	0,040 máx	0,025 máx
%Nb	-	0,005 máx
%V	-	0,005 máx
%Ti	-	0,005 máx

2.4.2.2 Microestrutura e propriedades mecânicas

Segundo a literatura o aço 8630 possui, em média, uma dureza de 179 – 229 HB associado a microestrutura perlita + ferrita (ASM, 1990). Esse é um aço hipoeutetóide, ou seja, possui uma concentração de carbono abaixo de 0,77% em sua composição, assim, quando resfriado lentamente, apresenta em sua microestrutura

ferrita, essa em maior concentração, e perlita. A concentração de perlita é diretamente proporcional a concentração de carbono nos aços (COLPAERT, 2008).

Segundo COLPAERT (2008), a temperabilidade de um aço é em função de sua composição química, tamanho de grão, quantidade e distribuição de inclusões, e essas características podem ser observadas pela forma e posição das curvas do diagrama TTT desses aços. O diagrama TTT do aço AISI 8630 está expresso na **Figura 2-9**.

No diagrama, é possível observar que é possível formar martensita no aço 8630 através de um rápido resfriamento no tratamento de têmpera. No entanto o Joelho da curva não se encontra muito deslocado para a direita.

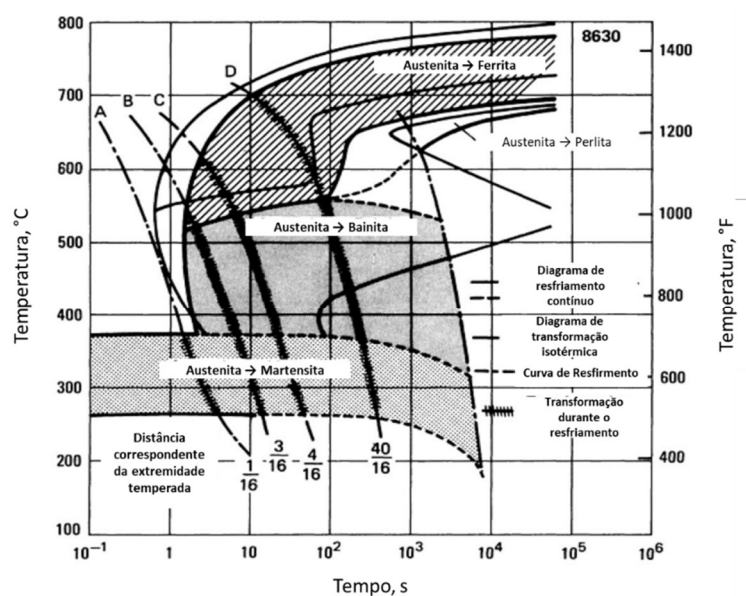


Figura 2-9: Diagrama TTT do aço AISI 8630 (Adaptado de ASM, 1994)

Como pode ser observado na **Figura 2-10** e onde é apresentado um comparativo das curvas de temperabilidade obtidas por ensaios Jominy para diversos tipos de aço.

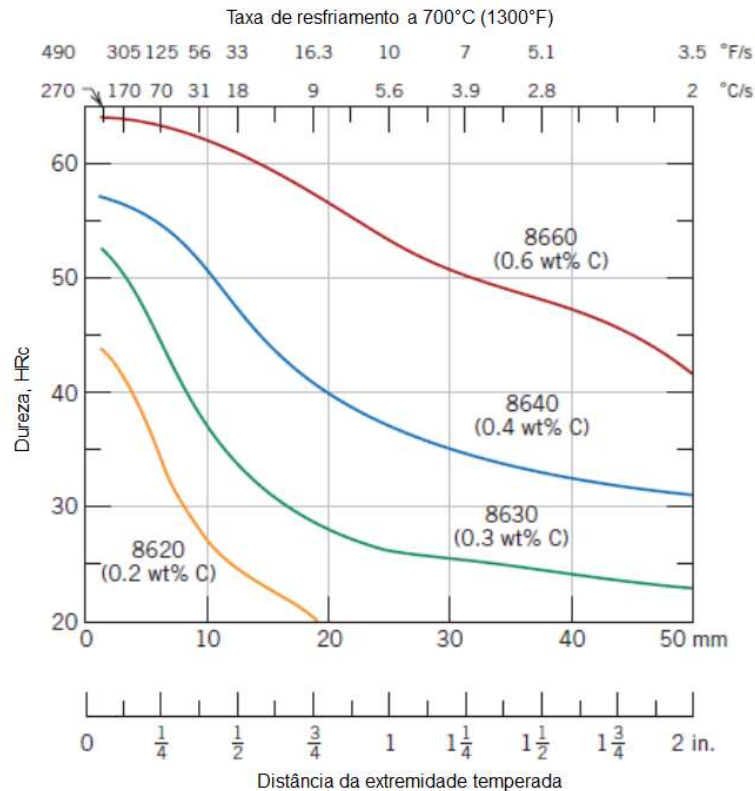


Figura 2-10 : Diagrama comparativo de curvas de temperabilidade para aços com mesma composição química e diferentes percentagens de carbono obtidas por ensaio Jominy (Adaptado de CALLISTER, 2010)

A **Figura 2-10** demonstra o efeito da concentração de carbono na temperabilidade. Nela é possível observar que quanto maior a concentração de carbono para um aço com os mesmos elementos de liga, maior a capacidade de formar martensita. Nesse sentido, o aço 8630 apresenta uma baixa temperabilidade quando comparado ao 8640 e 8660, e uma maior profundidade de endurecimento por têmpera quando comparado ao 8620.

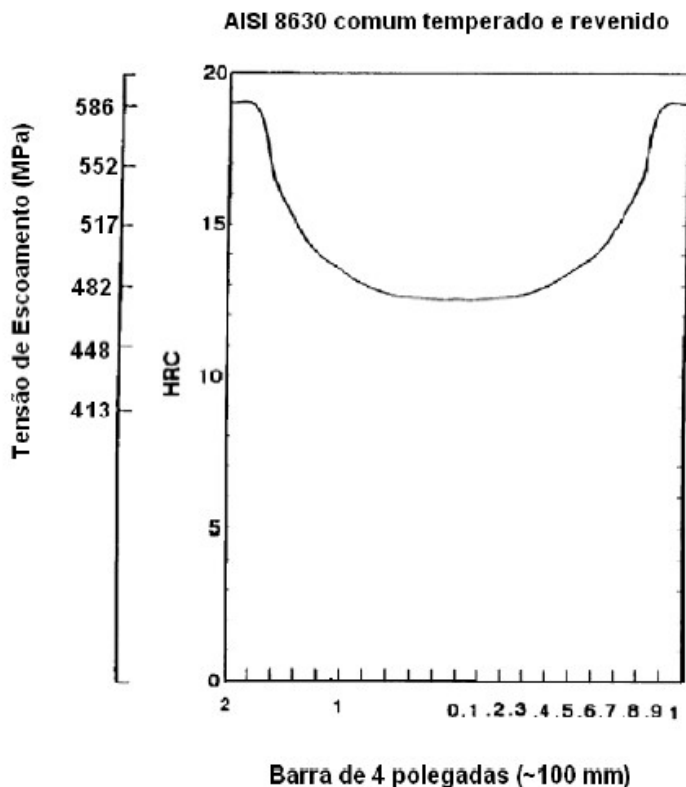


Figura 2-11: Profundidade da têmpera em um aço AISI 8630 (CANTARIN, 2010)

A **Figura 2-11** apresenta a profundidade da têmpera em uma barra de 4" analisada CANTARIN (2011). Nela pode-se observar uma queda brusca de dureza na parte mais interna da peça. Isso demonstra que a profundidade de têmpera não foi muito eficiente nesse ensaio.

Como mencionado anteriormente, ao ser submetido ao tratamento de têmpera e revenido, o aço AISI 8630 obtém como microestrutura a martensita revenida, que possui forma acicular.

A **Figura 2-12** apresenta as microestruturas registradas das amostras do ensaio de CANTARIN (2011), onde se pode observar martensita revenida em todas as três amostras.

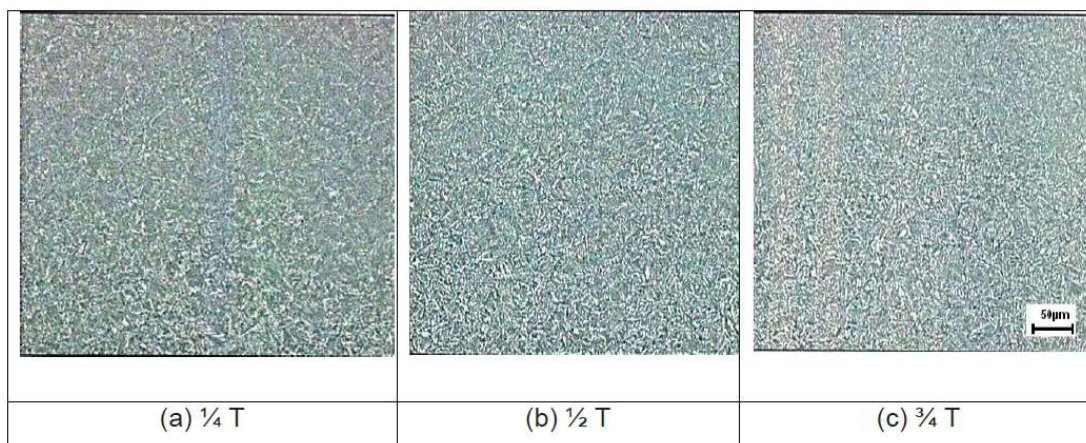


Figura 2-12 – Imagem obtida por microscopia ótica de amostras retiradas em várias espessuras diferentes na amostra do aço AISI 8630 comum – Aumento de 200x (CANTARIN,2011)

A respeito das propriedades mecânicas do aço AISI 8630 temperado e revenido, a **Figura 2-13** apresenta um gráfico demonstrando a variação das propriedades mecânicas dos aços 8630 temperados em função da temperatura de revenimento.

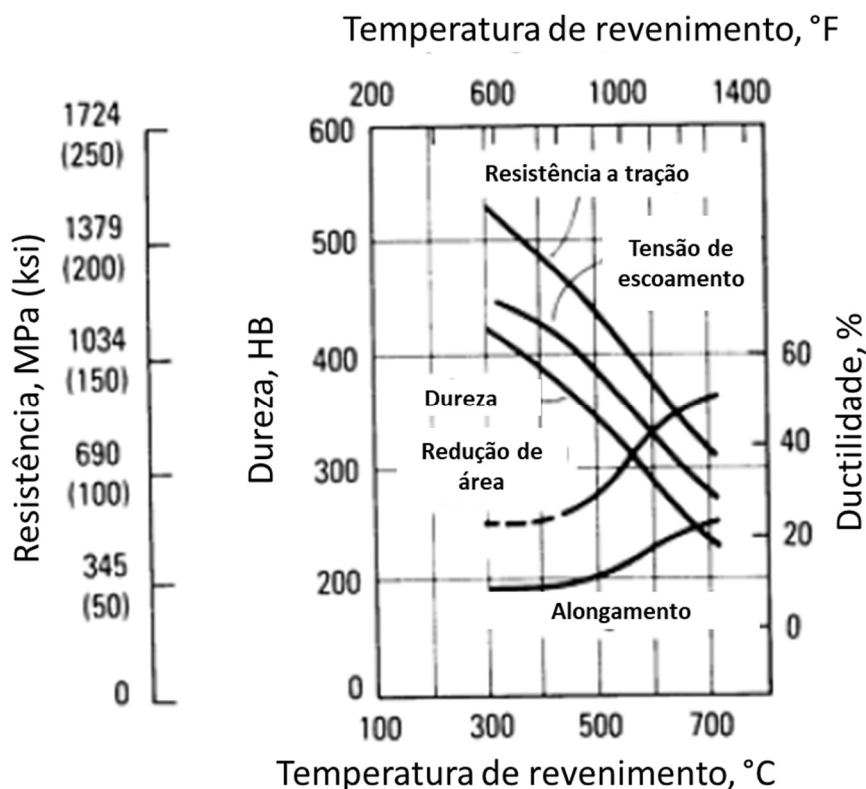


Figura 2-13: Variação das propriedades mecânicas de acordo com a temperatura de revenimento no aço AISI 8630 (Adaptado de ASM, 1990)

Nesse gráfico podemos observar uma queda da dureza, resistência mecânica e limite de escoamento conforme se aumenta a temperatura de revenimento. Por outro

lado, é possível se observar ganhos em redução de área e alongamento proporcionalmente à temperatura.

Essas curvas confirmam algumas características do revenimento como alívio de tensão e equilíbrio das propriedades mecânicas, já que o aço se torna menos frágil e mais maleável.

Em um estudo executado por CANTARIN, 2011, ensaio de tração foi realizado em uma amostra tubular, em aço AISI 8630 temperado e revenido, com diâmetros externo e interno de 343 mm e 89 mm, respectivamente. Os resultados foram avaliados considerando três espessuras do material, conforme indicado na **Tabela 2-2**, onde T corresponde a 127 mm:

Tabela 2-2 : Valores obtidos em ensaio de tração para o aço AISI 8630 comum temperado a 880°C e revenido a 660°C - 6h em relação a espessura (Adaptado de CANTARIN, 2011)

Região da Amostra	Dimensões (mm)	Seção do corpo de prova (mm ²)	Limite de Ruptura MPa	Limite de Escoamento MPa	Alongamento		Redução de Área %
					Lo (mm)	%	
¼ T	Ø12,48	122,33	680	518	50	24	61
½ T	Ø12,50	122,72	633	454	50	26	62
¾ T	Ø12,61	124,89	639	446	50	27	61

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Neste trabalho, foi utilizado o aço AISI 8630M2, que, como comentado anteriormente, é um aço de alta resistência e baixa liga modificado com aproximadamente 0,3% de carbono.

O material foi recebido em forma de tarugo, e foi conformado a quente pelo processo termomecânico de forjamento triaxial.

A peça foi posteriormente normalizada e passou por uma têmpera, sendo aquecida até a temperatura de 900°C até a completa transformação em austenita e resfriado em água. Posteriormente foi revenido à 640°C por uma hora.

Do tarugo, foram cortados nove corpos de prova a serem submetidos a um ensaio de tração uniaxial, além de três blocos com superfície retificada para ensaio de ultrassom. Esses últimos blocos foram dimensionados em 150 x 50 x 20 mm.

3.1.1 Composição Química

A **Tabela 3-1** contém a composição química do material de estudo, obtida por espectrometria de emissão ótica (AÇOFORJA, 2006).

Tabela 3-1: Composição química do material recebido

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	Al	Ti	V	Outros
% Peso	0,3152	0,8998	0,2412	0,025	0,007	0,888	0,3826	0,7982	0,74	0,023	0,007	0,006	<0,005

3.1.2 Tratamento térmico

Do material recebido foram retiradas três conjuntos de amostras, as quais foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos para posterior análise e comparação (**Tabela 3-2**). Com exceção da amostra CR, que foi mantida na condição como recebido como parâmetro comparativo com os demais tratamentos.

Tabela 3-2 : Identificação das amostras por condições de tratamento térmico

Condição	Identificação da Amostra
Material como recebido	CR
Temperado	T
Recozido	R

A Amostra T foi submetida a um aquecimento de 900° C por uma hora, seguido por têmpera em água. Já a amostra R, por sua vez, foi submetida a um aquecimento de 900°C por uma hora seguida de resfriamento no forno.

3.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

Toda a caracterização microestrutural utilizada neste trabalho foi executada no Laboratório de Materiais (LAMAT) do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ).

3.2.1 Preparação das Amostras

Para se realizar o estudo eficiente e adequado da microestrutura de um material, é imprescindível uma correta preparação metalográfica. Essa preparação consiste no corte da amostra, lixamento, polimento e ataque químico para revelação da microestrutura. No presente estudo, foram utilizadas as técnicas convencionais de metalografia (embutimento das amostras em baquelite, lixamento e polimento).

As amostras foram cortadas de maneira que a superfície a ser observada no microscópio fosse paralela ao plano transversal ao eixo submetido às medidas ultrassônicas.

Em seguida, foram lixadas com o auxílio de lixas d'água de granulometrias de 100, 220, 320, 400, 500 e 600 mesh, uma seguida da outra em discos rotatórios refrigerados com água.

Realizado o lixamento das amostras, elas foram polidas utilizando pasta de diamante de granulometria de 6, 3 e 1 μm , lubrificando-se com glicerina e refrigerando-se com álcool.

Os ataques químicos utilizados para a revelação da microestrutura das amostras foram nital 2%, realizado pelo método de imersão, conforme norma ASTM E407 (2015) e ácido pícrico saturado em água, realizado por esfregaço.

Foi escolhido esse ataque químico pois ele possibilita a revelação dos contornos de grão da austenita prévia, uma vez que esse parâmetro morfológico é o mais interessante para a análise metalográfica nesse estudo, pois, conforme mencionado anteriormente, busca-se uma correlação entre a atenuação de sinal e a microestrutura.

Nas análises realizadas por EBSD, o preparo das amostras foi realizado similarmente nas fases de lixamento e polimento, no entanto, em seguida foram submetidas a um polimento adicional em uma solução sílica coloidal com 0,25 μm , com uma carga axial de 170g por uma hora, com o objetivo de se retirar quaisquer resquícios de deformações na superfície.

3.2.2 Análise Micrográfica

Tendo sido preparadas as amostras conforme mencionado na seção anterior, elas foram analisadas no microscópio óptico Olympus BX60M, onde foi realizado um mapeamento geral da microestrutura. Foi utilizado o software Olympus Stream Essentials com aumento de 500x para a aquisição das imagens.

Após uma primeira verificação visual e identificação das principais fases presentes, as amostras passaram pelo microscópio óptico de varredura (MEV) CamScan 3200LV funcionando a 20kV e com *stepsize* de 0,5 μm , em uma área de 400 x 300 μm , com o objetivo de determinar o tamanho dos grãos das fases e sua proporção.

As análises dos resultados obtidos pelo MEV-EBSD, foram realizadas através do plug-in MTEX do software Matlab, utilizado para análise de resultados obtidos pela técnica de difração de elétrons retroespalhados, principalmente, nesse caso, para as medidas de tamanho de grão da austenita prévia e densidade de discordâncias.

3.3 ANÁLISE DE DUREZA

Para mensurar a dureza dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers com aplicação de uma carga de 500 gramas por 15 segundos (HV0,5), em conformidade com a norma ASTM E384-17 (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho serão apresentados nessa seção considerando-se os experimentos realizados no laboratório do CEFET-RJ relativos à análise metalográfica e detalhados na seção anterior.

Serão levados em consideração para serem comparados com os resultados obtidos nesse trabalho, as medidas dos ensaios de ultrassom realizados pelo aluno Francisco Nipo, e apresentados em sua proposta de dissertação de mestrado, na qual se baseia a ideia de correlação do presente trabalho.

Conforme anteriormente mencionado, esse projeto tem como fim estabelecer uma correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas do aço AISI 8630M2, através da caracterização do ponto de vista microestrutural e mecânico desses aços submetidos a diferentes tratamentos térmicos, – têmpera e revenido para a amostra CR; têmpera para amostra T e recozimento para amostra R- comparando os resultados apresentados em técnicas convencionais de análise microestrutural e de propriedades mecânicas e os resultados apresentados utilizando-se técnicas de ensaio de ultrassom.

4.1 ULTRASSOM

No ensaio de ultrassom, as três amostras foram condicionadas de forma a possuírem a mesma perpendicularidade em relação ao feixe sônico, de sorte que suas superfícies fossem colocadas em um mesmo plano. Como pode ser observado na **Figura 4-1**, o ensaio de ultrassom foi realizado com a peça em imersão, e a temperatura da água foi mantida em $21\pm 1^{\circ}\text{C}$.

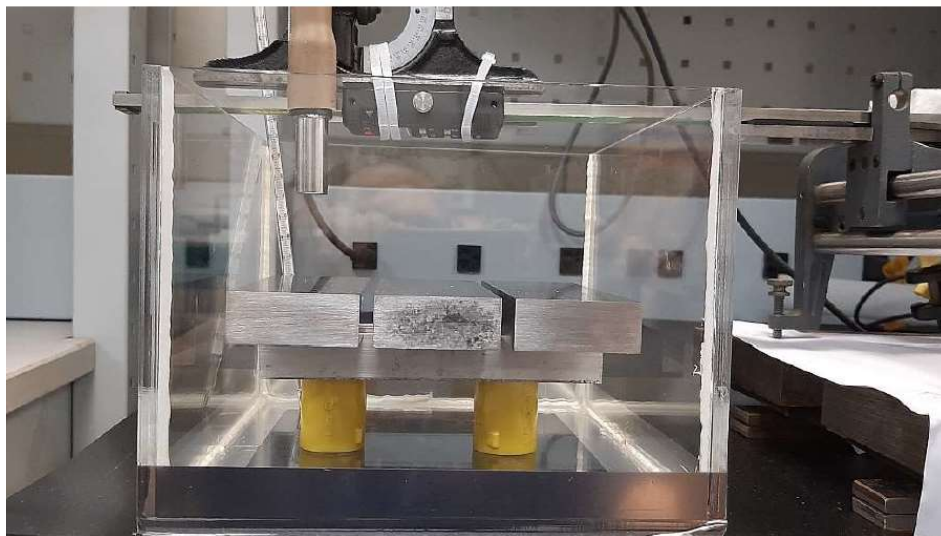


Figura 4-1 : Fotografia retirada do tanque de imersão do ensaio de ultrassom contendo as amostras, o transdutor e o termômetro (Adaptado de SILVA, 2020)

O posicionamento do transdutor foi pensado de forma a se obter a amplitude máxima dos sinais ultrassônicos. Ele foi posicionado a uma distância de 69,0 mm da superfície da amostra ensaiada, ou seja, dentro da distância focal do transdutor na água, que é de 76,2 mm.

Em uma mesma varredura, adquiriu-se sinais em cinco pontos com 1,0 mm de espaçamento entre eles. Todos os parâmetros e distâncias foram repetidos para as três amostras.

No ensaio, mediu-se as velocidades ultrassônicas considerando o tempo decorrido entre a emissão do sinal e o seu retorno à superfície (TOF – *time of flight*) das ondas longitudinais e transversais refratadas. Como mencionado na seção “2.3.1.1 Velocidade” desse trabalho, a velocidade é determinada dividindo-se a espessura da peça pelo TOF, vide **Equação 2-2**.

Foi medida também a atenuação de sinal ultrassônico, medida da redução da amplitude entre dois ecos consecutivos da onda longitudinal. Os valores encontrados estão dispostos na **Tabela 4-1**.

Tabela 4-1 : Valores de velocidade de onda ultrassônica e atenuação de sinal (SILVA,2020)

Amostras (SAE 8630M2)	Velocidade		Coeficiente de Atenuação (dB/mm)	Coeficiente de Poisson
	Onda Longitudinal (m/s)	Onda Transversal (m/s)		
Como Recebida	6,776 ± 0,001	12,368 ± 0,008	0,116 ± 0,005	0,285 ± 0,001
Temperada	6,838 ± 0,003	12,624 ± 0,019	0,063 ± 0,004	0,290 ± 0,005
Recozida	6,792 ± 0,003	12,464 ± 0,011	0,030 ± 0,010	0,288 ± 0,001

Foram avaliados os parâmetros de velocidade de propagação e coeficiente de atenuação, pois eles podem fornecer informações sobre as variações microestruturais e sobre as propriedades mecânicas dos materiais que passaram por tratamentos térmicos.

A **Tabela 4-1** apresenta valores diferentes para cada amostra, mesmo tendo todas elas partido de uma mesma peça. A partir daí poderemos avaliar a forma em que cada tratamento impactou nos valores de ensaio.

A velocidade de propagação, por exemplo, segundo SANTIN (2003), tende a ser maior tanto quanto maior for a homogeneidade da microestrutura, nesse sentido, a microestrutura martensítica apresenta maiores barreiras para a propagação do feixe sônico quando comparado com a microestrutura ferrítica (TOOZANDEHJANI *et. al*,2015).

Portanto, a microestrutura resultante de cada tratamento térmico empregado nas amostras tem relação direta com a forma com que o feixe sônico percorre o material. Por isso é preciso avaliar os resultados obtidos na análise metalográfica dos corpos de prova para se estabelecer uma correlação com os resultados obtidos.

No entanto, é possível notar a partir da **Tabela 4-1**, que ao compararmos os resultados de ultrassom, a diferença entre os valores de velocidade obtidos é da ordem de 3%. Isso denota que a variação de velocidades não é significativa sendo, portanto, irrelevante para a correlação. De todo modo, será apresentada na discussão, a influência sofrida por esse parâmetro diante das condições de tratamento térmico e densidade de discordância, traçando-se um paralelo com o previsto pela literatura.

Já os valores de atenuação apresentaram variações mais significativas, apontando, em primeira análise, uma possível correlação com as condições de tratamento térmico.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A fim de caracterizar a microestrutura das amostras em estudo, conforme descrito no capítulo 3, foi utilizada a microscopia ótica com amostras atacadas de duas formas, a primeira a fim de destacar os contornos de grão da austenita prévia e a segunda para revelar a microestrutura em si.

4.2.1 Material Como Recebido

4.2.1.1 Caracterização por microscopia ótica

Conforme mencionado anteriormente, o material recebido passou por foi temperado a 900°C em água e revenido a 640°C por uma hora. E como previsto na literatura, pode-se caracterizar nas micrografias apresentadas nas **Figura 4-2** e **Figura 4-3**, uma microestrutura composta por martensita revenida.

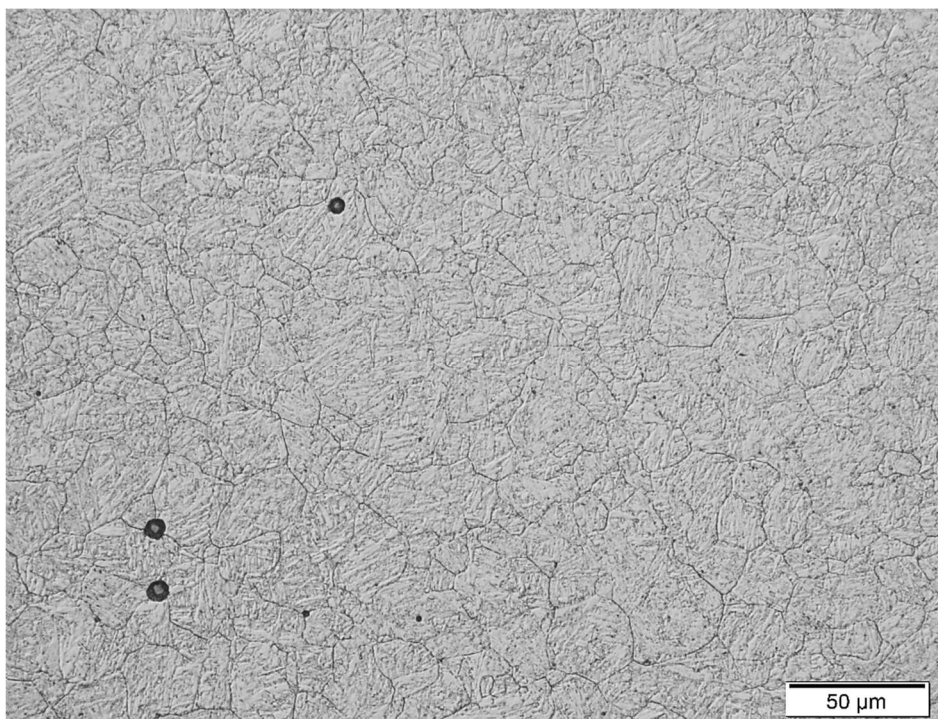


Figura 4-2 : Imagem obtida por microscopia ótica da amostra CR. Microestrutura composta por martensita revenida. Ataque com ácido pícrico saturado em água. Aumento 500x

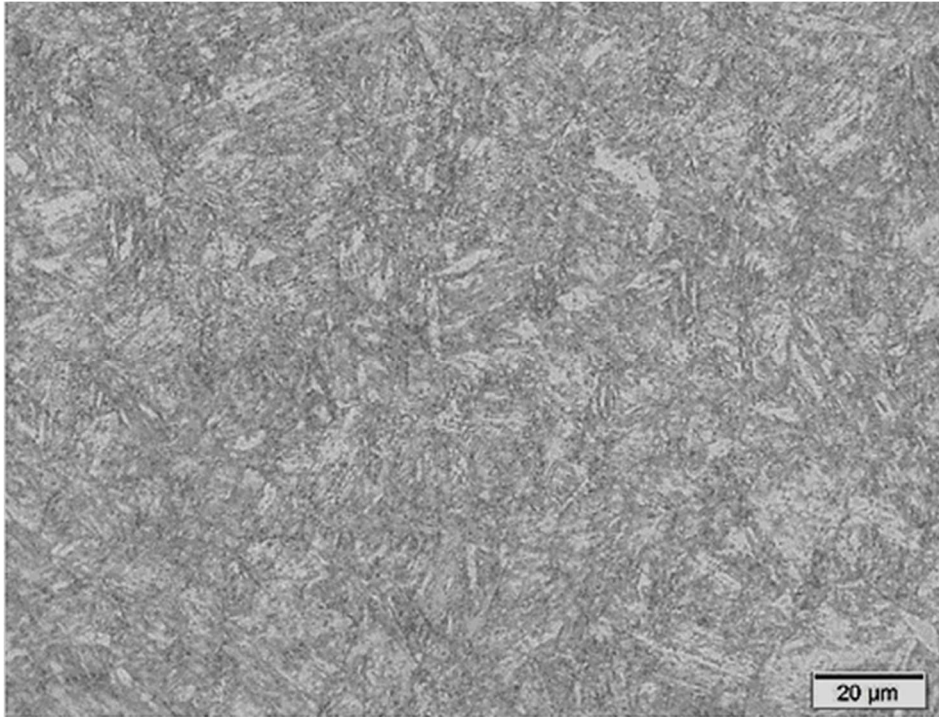


Figura 4-314 : Imagem obtida por microscopia ótica da amostra CR. Microestrutura composta por martensita revenida. Ataque com nital 2%. Aumento 1000X

A **Figura 4-2** apresenta a microestrutura da amostra após o ataque com ácido pícrico saturado, é possível observar de forma bem definida os contornos de grão da austenita prévia. É possível notar uma distribuição aparentemente homogênea do tamanho de grão neste caso.

Por sua vez, quando atacada com o reagente nital, como mostrado na **Figura 4-3**, é possível observar a estrutura dos pacotes e ripas em uma microestrutura tipicamente martensítica, no caso específico desta amostra, o revenimento é perceptível devido à precipitação ao longo das agulhas da martensita.

A imagem obtida na micrografia apresentada na **Figura 4-3**, demonstra uma microestrutura semelhante àquela apresentada na **Figura 4-4** por DUARTE (2014), em um estudo sobre o aço AISI 8630M amanteigado por processo de soldagem.

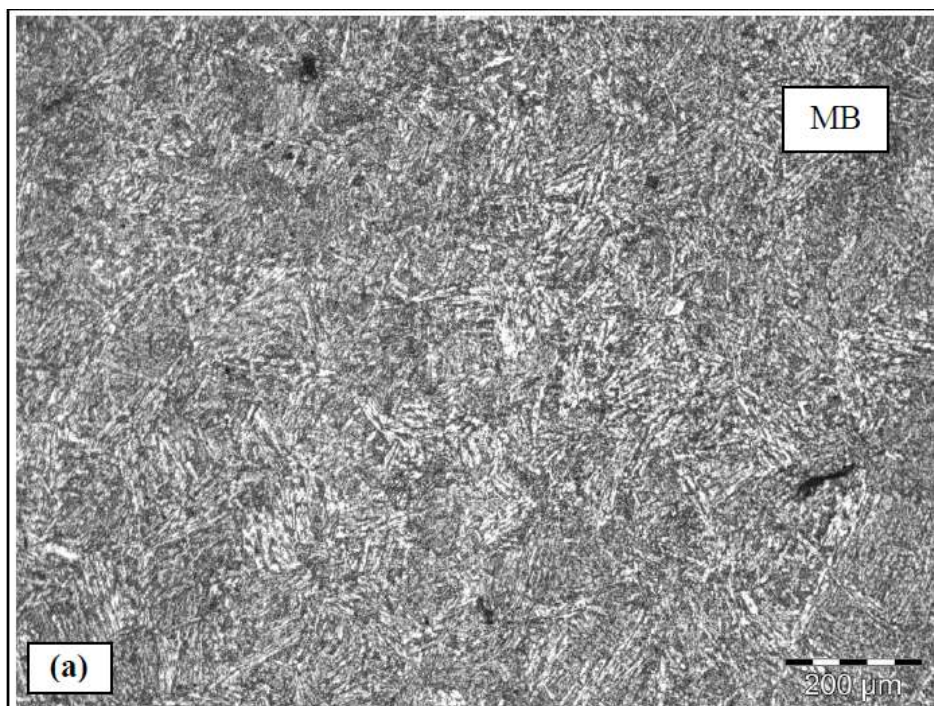


Figura 4-4 : Fotomicrografia apresentando microestrutura composta por martensita revenida. Ataque nital 2%. Aumento de 100x (DUARTE, 2014)

4.2.2 Caracterização por MEV-EBSD

Foram ainda realizadas duas varreduras na amostra como recebido (CR), considerando-se duas regiões distintas da peça. Um dos objetivos da utilização da técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD) com o microscópio óptico de varredura (MEV), era correlacionar a densidade de discordâncias e a atenuação de sinal ultrassônico, que são duas grandezas diretamente relacionadas às condições de processamento e tratamentos térmicos aos quais foram submetidas as amostras. Outro objetivo era medir os grãos de austenita prévia nas três amostras, a fim de que, através de uma comparação entre os resultados obtidos, estabelecer uma correlação entre a atenuação causada por esses contornos.

A **Figura 4-5** apresenta os resultados obtidos na primeira varredura. Na **Figura 4-5a** pode-se observar a microestrutura composta de martensita revenida, enquanto na **Figura 4-5b** deu-se destaque aos contornos de grão da austenita prévia, onde encontrou-se um tamanho de grão na ordem de $5,52 \pm 1 \mu\text{m}$.

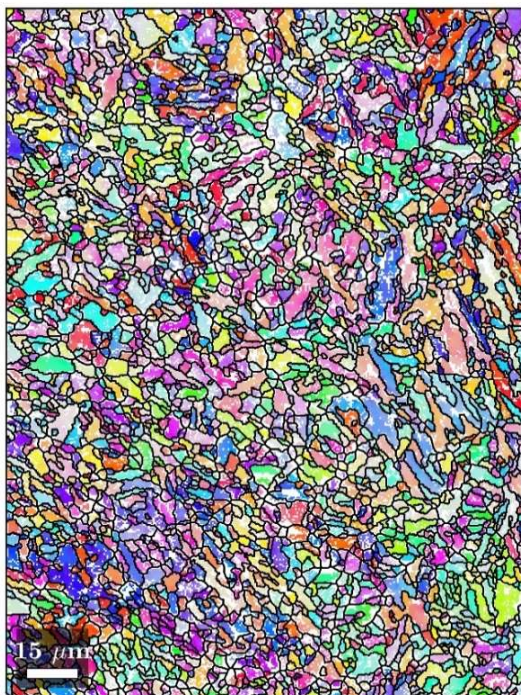
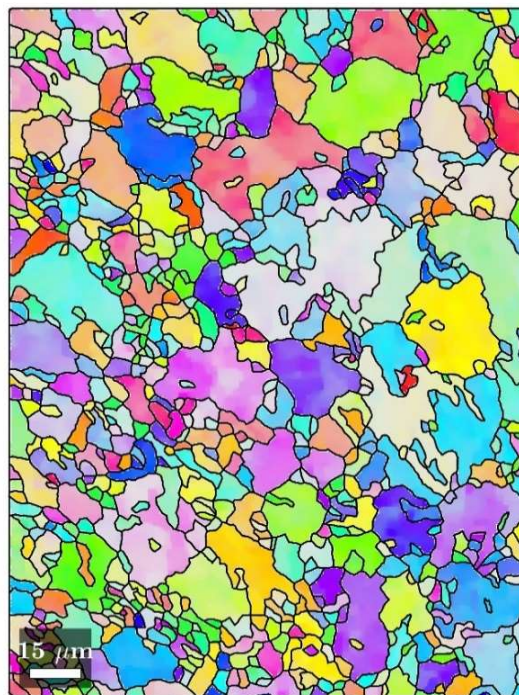
**Figura 4-5a****Figura 4-5b**

Figura 4-5 : Resultados EBSD para a Varredura 1 da amostra como recebido. Aumento 500X.(a) Martensita (b) Austenita Prévia

A **Figura 4-6** apresenta os resultados obtidos na segunda varredura. observa-se uma variação do tamanho de grão da austenita prévia quando comparamos com a **Figura 4-6b**, isso pode ser relacionado à qualidade da varredura, que é medida pelo grau de indexação. Para a microestrutura da **Figura 4-6b**, foi encontrado um tamanho de grão da austenita prévia de $9,26 \pm 3,78 \mu\text{m}$.

Como citado, o mapa obtido na varredura 2 foi gerado com maior indexação, que possui relação direta com a qualidade e validade dos dados obtidos, desta forma para a discussão destes resultados serão considerados apenas os resultados desta varredura.

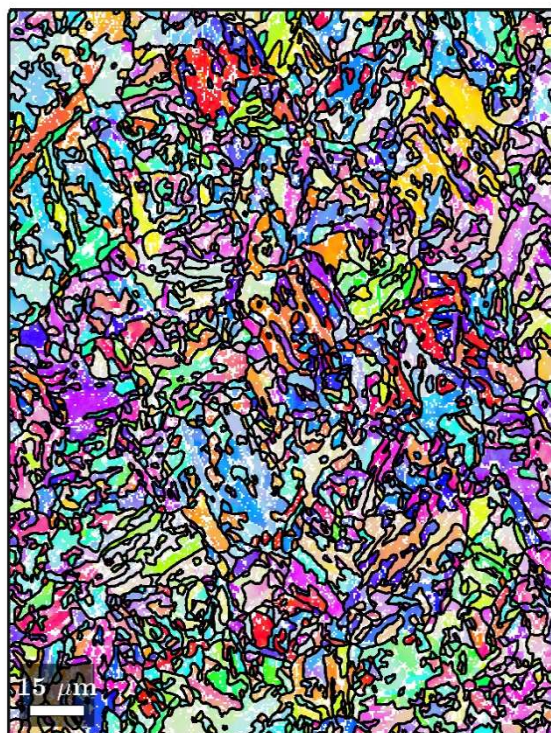


Figura 4-6a

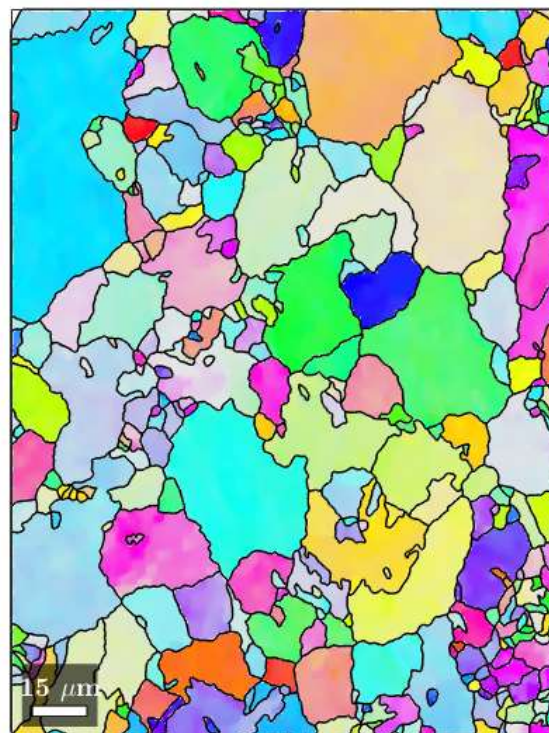


Figura 4-6b

Figura 4-6 : Resultados EBSD para a Varredura 2 da amostra como recebido. Aumento 500X. (a) Martensita (b) Austenita Prévía

Outro resultado obtido na análise desta amostra por MEV-EBSD permitiu a obtenção do valor de densidade de discordâncias, novamente será considerado apenas o valor da varredura 2 para a discussão destes resultados. Neste contexto o valor obtido foi de $2,75 \times 10^{14}/\text{mm}^2$. Esse parâmetro é de suma importância, pois, uma das hipóteses que se considera como causa da atenuação de sinal é a densidade de discordâncias. Segundo BARRA *et. al* (2015), o feixe sônico sofre um espalhamento ao se deparar com uma discordância, o que gera uma perda de energia do feixe sônico.

Além da redução da atenuação, BARRA *et. al* (2015) acredita que a velocidade de propagação do sinal sofra uma redução na ordem de 1% na presença de discordâncias. Ao analisar os resultados obtidos no ensaio de ultrassom para as amostras como recebido e temperada (**Tabela 4-3**), nota-se que a amostra “CR” apresentou velocidade de propagação longitudinal e transversal inferior a amostra “T”, ao passo que o valor de atenuação da primeira foi superior ao da segunda.

Tabela 4-2 : Resultados obtidos no ensaio de ultrassom para as amostras CR e T (Adaptado de SILVA, 2020).

Amostras (SAE 8630M2)	Velocidade		Coeficiente de Atenuação (dB/mm)
	Onda Longitudinal (m/s)	Onda Transversal (m/s)	
Como Recebida	6,776 ± 0,001	12,368 ± 0,008	0,116 ± 0,005
Temperada	6,838 ± 0,003	12,624 ± 0,019	0,063 ± 0,004

Ao compararmos os resultados obtidos com as considerações de BARRA *et. al* (2015), seria possível intuir que a amostra CR apresenta uma densidade de discordâncias maior do que a amostra T, uma vez que apresenta uma velocidade menor e um coeficiente de atenuação superior (sendo as duas amostras de natureza martensítica).

Entretanto, era esperado que, por conta do revenido, na amostra como recebido, devido ao alívio de tensões e homogeneização da microestrutura, apresentasse uma densidade de discordância menor, e por isso um, valor de atenuação mais baixo. Além disso, segundo SANTIN (2003), um feixe de onda que se propaga em um meio homogêneo sofre menos perdas.

Uma possibilidade a se considerar, se baseia no fato da amostra temperada ter passado por mais um círculo de tratamento térmico quando comparado com a amostra CR. Isto é, a amostra T, que previamente havia sido temperada e revenida (condição do material como recebido), foi aquecida a 900°C e resfriada em água. Esse novo ciclo de tratamento térmico, especialmente a nova austenitização, pode ter gerado uma recuperação e, conseqüentemente, um efeito sobre a densidade das discordâncias com implicação nos sinais obtidos pelo ultrassom.

De fato, este trabalho propõe, apesar da ausência das medidas para as demais amostras, que o histórico de processamento mecânico e térmico exerce influência nos valores obtidos no ultrassom, como no caso apresentado para a amostra T.

Contudo, se faz necessário salientar que, com os resultados obtidos, não se pode expandir a discussão a esse nível, uma vez que se têm apenas os valores de densidade de discordância para a amostra “CR”.

4.2.3 Amostra Temperada (T)

A segunda amostra, como mencionado anteriormente, passou pelo tratamento de têmpera, sendo aquecida a uma temperatura de 900°C e posteriormente resfriada em água. E como esperado pela literatura, apresenta uma microestrutura completamente martensítica.

Na micrografia apresentada na **Figura 4-7**, foi realizado o ataque químico com ácido pícrico. Nela, é possível observar de forma bem definida os contornos de grão da austenita prévia. Essa amostra foi mais atacada quimicamente, por isso apresenta esses contornos mais escuros.

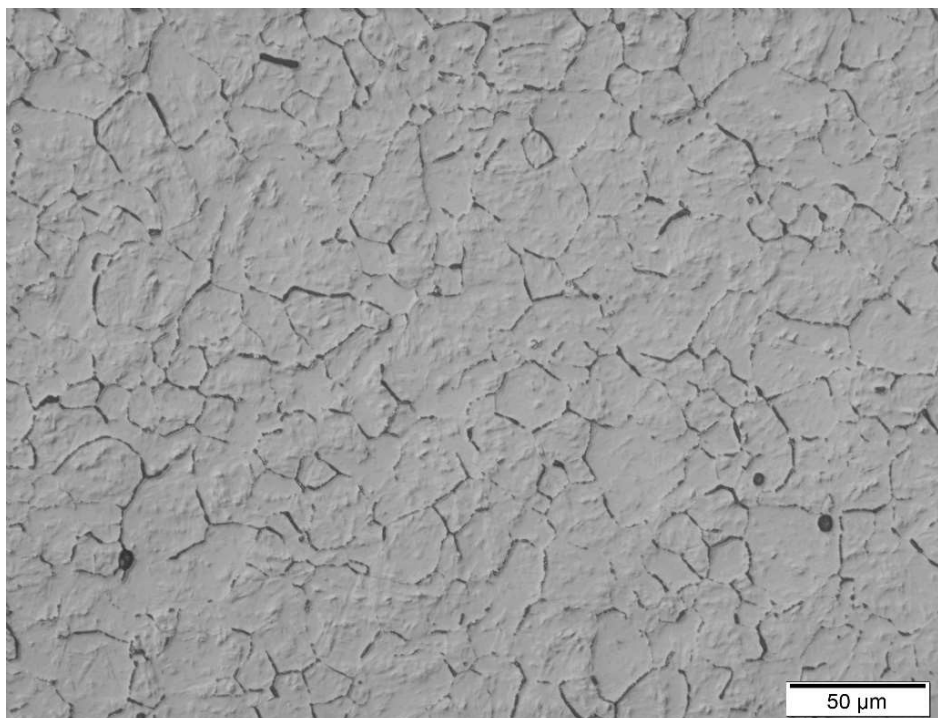


Figura 4-715 : Imagem obtida por microscopia óptica da amostra T. Microestrutura composta por martensita. Aumento de 500x

Quando se compara a **Figura 4-7** com a amostra da **Figura 4-2** não pode ser observar diferença sensível de do tamanho de grão das austenita prévia, apesar da impossibilidade de medição deste parâmetro, devido ao ataque não revelar de forma contínua estes grãos. No entanto, a simples comparação aparente, reforça a hipótese de que a execução dos tratamentos térmicos sempre utilizando a mesma rota de austenitização, não promoveu grandes diferenças no tamanho de grão da austenita prévia entre as amostras, descartando a possibilidade do efeito dessa variável sobre os diferentes valores obtidos nas análises por ultrassom, como visto na Tabela 4.1

Já a amostra da **Figura 4-8**, foi atacada com nital. Dessa forma, é possível observar com mais clareza, quando comparado com a **Figura 4-7** uma microestrutura tipicamente martensita com agulhas bem definidas, apesar da indefinição no tamanho dos pacotes.



Figura 16 : Imagem obtida por microscopia óptica da amostra T. Microestrutura composta por martensita revenida. Ataque com nital. Aumento de 1000X.

4.2.4 Amostra Recozida (R)

A amostra R, conforme mencionado anteriormente, também foi aquecida a uma temperatura de 900°C até a completa austenitização e depois resfriada no forno. Resultado do tratamento de recozimento, a amostra apresenta uma microestrutura constituída de ferrita e perlita. Na micrografia da **Figura 4-9**, identifica-se a ferrita como os grãos mais claros e a perlita como os grãos mais escuros.

A microestrutura típica de uma amostra recozida descarta a necessidade de dois ataques para destacar a presença dos grãos da austenita prévia. Novamente, apesar de aparente, a comparação direta com as demais amostras, exhibe uma microestrutura ligeiramente mais refinada e homogênea, como esperado para essa condição de tratamento térmico. Pela concentração de carbono no aço hipoeutetóide,

é possível observar na **Figura 4-9**, a maior presença da área branca, ou seja, uma maior concentração de ferrita.

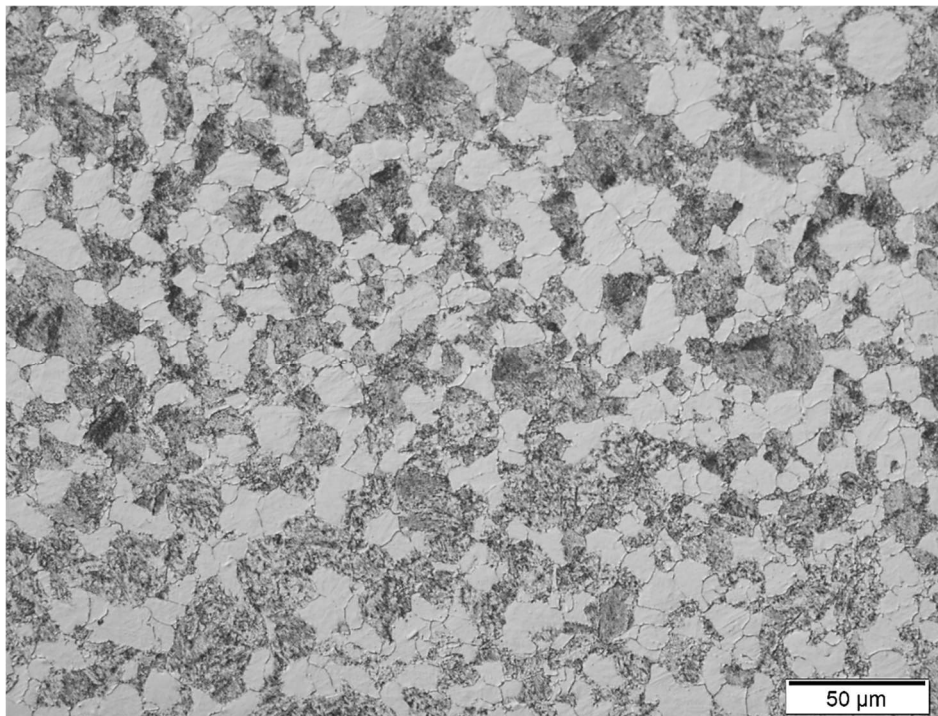


Figura 4-9 : Imagem obtida por microscopia óptica da amostra R. Microestrutura composta por ferrita e perlita. Ataque com nital. Aumento de 500x

4.2.5 Comparação Entre as Amostras

Vale notar que as três amostras foram austenitizadas à mesma temperatura, isso fez com que a variação morfológica - no que diz respeito ao tamanho dos grãos da austenita prévia e dos pacotes de martensita - não tenha sofrido grandes alterações. Neste trabalho, só foi possível mensurar o tamanho da austenita prévia na amostra CR, onde foi encontrado o valor de $9,26 \pm 3,78 \mu\text{m}$. No entanto, através das micrografias resultadas da análise no MO (**Figura 4-2**, **Figura 4-7** e **Figura 4-9**), podemos avaliar, de forma qualitativa, que os tamanhos de grão da austenita prévia são da mesma ordem de grandeza.

De acordo com SANTARIN (2003), a atenuação de sinal sônico pode se dar por perdas de transmissão, efeitos de interferência e dispersão do feixe. Ocorrendo, principalmente, pela dispersão em limites estruturais (grãos, limites de grãos, inclusões e poros) em um material policristalino (TOOZANDEHJANI *et. al*, 2015).

Apesar de não se comportar como um contorno de grão propriamente dito, no que tange seu efeito sobre as propriedades mecânicas, os contornos de grão da austenita prévia foram considerados inicialmente como possíveis atenuadores do feixe ultrassônico. Segundo BERGNER *et. al* (1993) para baixas frequências os sinais de ultrassom podem ser atenuados tanto pelos contornos da austenita prévia, efeito Rayleigh, quanto pelos pacotes de martensita, devido à absorção termoelástica. Contudo, neste trabalho não se espera grande alteração da atenuação devido ao grão da austenita prévia, uma vez que, aparentemente, não houve variação significativa do tamanho destes grãos entre as amostras. Neste sentido, outras variáveis foram levantadas a fim de justificar as diferenças entre os valores de perda de energia do sinal no ensaio de ultrassom exposto na **Tabela 4-1**.

Tendo sido apresentados os resultados das análises metalográficas, pode-se discutir os efeitos que os tratamentos térmicos causaram na microestrutura, e, por conseguinte, nos parâmetros ultrassônicos. Na **Figura 4-10** pode-se observar que a amostra recozida apresenta o menor valor de atenuação sônica. Isso pode ser explicado por três motivos.

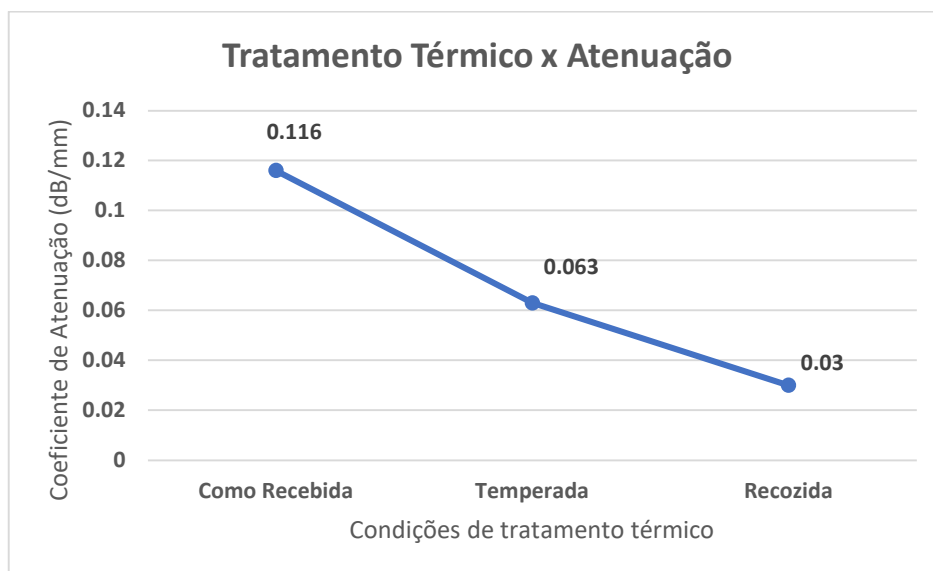


Figura 4-10 : Curva correlacionando tratamento térmico x coeficiente de atenuação sônica

O primeiro motivo está associado com a organização morfológica da microestrutura. A **Figura 4-9** apresenta a amostra "R" recristalizada e homogênea, e, conforme mencionado anteriormente, o feixe sônico encontra menos obstáculos nesses meios.

Em segundo lugar, a ferrita presente na microestrutura, devido ao seu grão mais alongado quando comparado à martensita, facilita a propagação da onda ultrassônica, oferecendo menos resistência, e conseqüentemente, menos perdas.

Por fim, por ter passado por um resfriamento lento e recristalização, possivelmente houve uma redução na densidade de discordâncias e reorganização das mesmas.

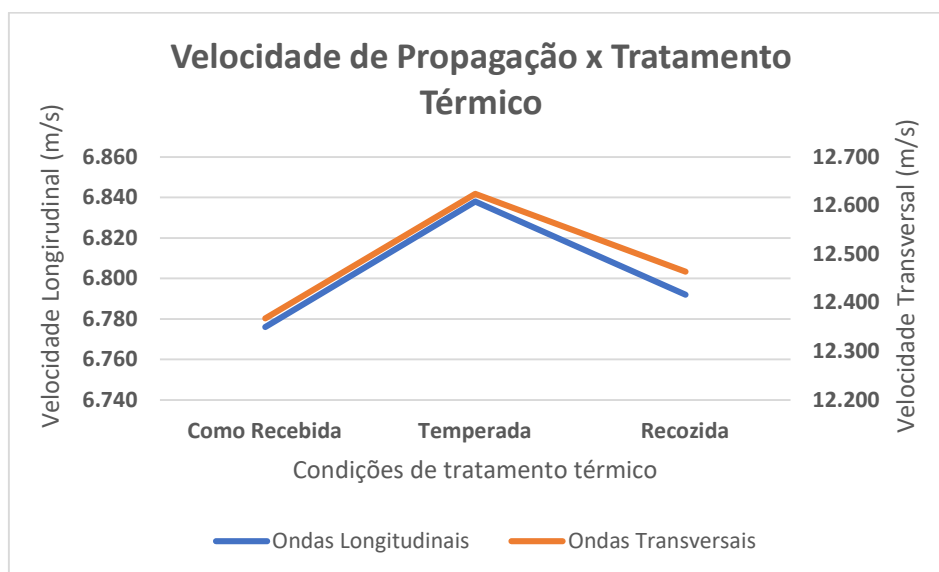


Figura 17 : Curva correlacionando tratamento térmico x velocidade de propagação

Ao analisar os resultados obtidos para as velocidades de propagação das ondas longitudinais e ondas transversais, consideram-se princípios semelhantes aos correlacionados com a atenuação. A **Figura 4-11** apresenta o gráfico que correlaciona as velocidades de propagação encontradas no ensaio de ultrassom com os tratamentos térmicos realizados nas amostras.

A microestrutura martensítica, pela sua morfologia mais refinada, ou seja, agulhas de martensita pouco espalhadas entre si, oferece mais resistência à passagem do feixe sônico. Por conta disso, eram esperados valores de velocidades superiores para a amostra “R” quando comparado a amostra “T” e “CR” (TOOZANDEHJANI *et. al*, 2015).

No entanto, contraditoriamente, a amostra temperada apresentou velocidade de propagação superior à amostra recozida e à amostra como recebido, enquanto era esperado que para a amostra “T” era esperado o menor valor de velocidade entre as três amostras, visto que a amostra “CR”, por ter sido revenida, sofreu certa

homogeneização da microestrutura. Essa diferença pode estar associada ao estado de tensões internas da amostra temperada, sendo ele, entre as amostras, teoricamente o mais tensionado, o que pode ter interferido nos valores de velocidades.

Contudo, com os dados obtidos nesse trabalho, não é possível afirmar categoricamente o motivo da velocidade de propagação na amostra temperada ser superior a velocidade de propagação da amostra recozida.

Os efeitos dos tratamentos térmicos sobre a microestrutura, gera consequências diretas nas propriedades mecânicas dos materiais, e esses efeitos também podem ser notados pelas medidas ultrassônicas. Portanto, foram analisados os valores de dureza obtidos nos ensaios para se discutir uma correlação entre dureza, microestrutura, velocidade de propagação e atenuação sônica.

4.3 DUREZA

Conforme mencionado anteriormente, foram realizados ensaios de microdureza Vickers (HV0,5) ao longo da seção transversal das amostras de estudo. Foram realizadas, em média, três impressões por região, considerando um espaçamento de 2,0 mm entre regiões, como recomenda a norma ASTM E 384-17 (2017). A **Tabela 4-3** apresenta os resultados obtidos nesses ensaios:

Tabela 4-3 : Resultados dos ensaios de dureza e microdureza realizados nas amostras

Amostras (SAE 8630M2)	Microdureza Vickers (HV)
Como Recebido	296,9 ± 2,3
Temperado	531,9 ± 4,0
Recozido	259,7 ± 3,0

Como esperado, a amostra “T” apresenta os maiores valores de dureza, devido à sua microestrutura martensítica (**Figura 4-7**), formada pelo resfriamento rápido, não dando tempo para a difusão e gerando alto grau de tensões internas.

Em seguida têm-se a amostra “CR”, composta de martensita revenida (**Figura 4-2**), apresentando valores de dureza consideravelmente inferiores à amostra mencionada anteriormente. Tal diferença nessas medidas é característica do revenido

realizado na amostra como recebida, que equilibra as propriedades mecânicas, reduzindo a dureza e promovendo um alívio de tensões.

Já a amostra “R”, por possuir uma microestrutura mais homogênea, composta por perlita e ferrita (**Figura 4-9**), apresenta os menores valores de dureza quando comparado com as duas outras amostras.

Portanto, os valores de dureza encontrado nos ensaios foram compatíveis com o esperado pela literatura, considerando-se os resultados apresentados para as análises no MO. A **Figura 4-12** traça uma curva com os valores obtidos de dureza para cada tratamento térmico realizado.

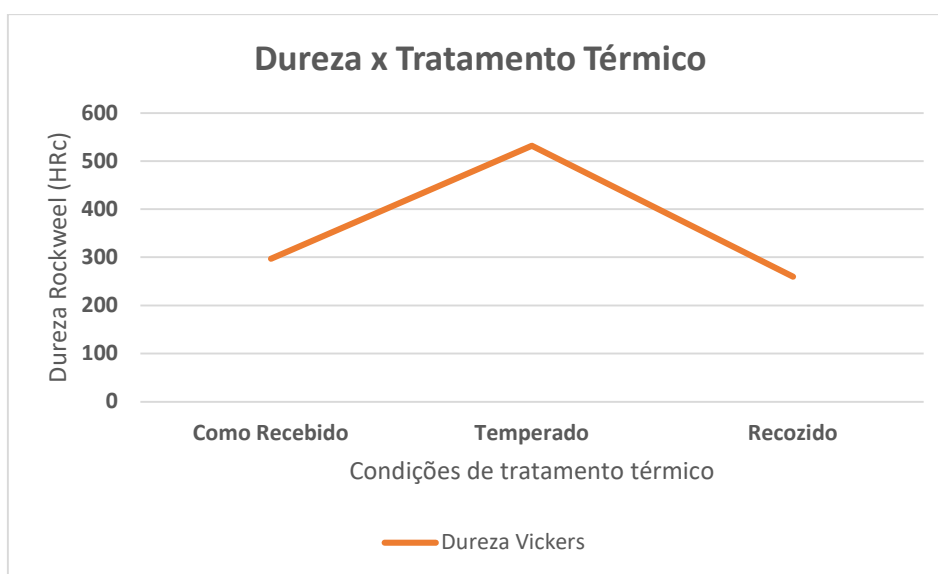


Figura 4-12 : Resultados obtidos nos ensaios de dureza para cada condição de tratamento térmico

Pode-se observar através do gráfico que a amostra “R” apresenta o menor valor de dureza quando comparada às demais amostras. A ferrita, grãos com coloração clara na microestrutura da amostra recozida (**Figura 4-9**), tem a característica de ser mais maleável e menos dura do que a martensita, constituinte da amostra “T” (**Figura 4-7**) e a martensita revenida, resultado da amostra CR (**Figura 4-2**).

A amostra recozida também apresenta menos tensões internas na microestrutura. O tratamento de têmpera provoca uma transformação muito rápida, não tendo tempo para difusão e gerando um acúmulo de tensões. Esse fator contribui para os valores de dureza, maior na amostra “T”, e intermediário na amostra “CR”, pois essa última passou pelo revenido para alívio de tensões.

Como já mencionado anteriormente, o caráter mais homogêneo da microestrutura e o acúmulo de tensões internas, interferem nas medidas ultrassônicas. Segundo NANEKAR *et. al* (2004) observa-se uma variação da velocidade e da atenuação, no ensaio ultrassônico, associados a diferentes valores de dureza.

Pode-se observar na **Figura 4-13** e na **Figura 4-14** que a curva de dureza acompanha as curvas de velocidade de propagação.

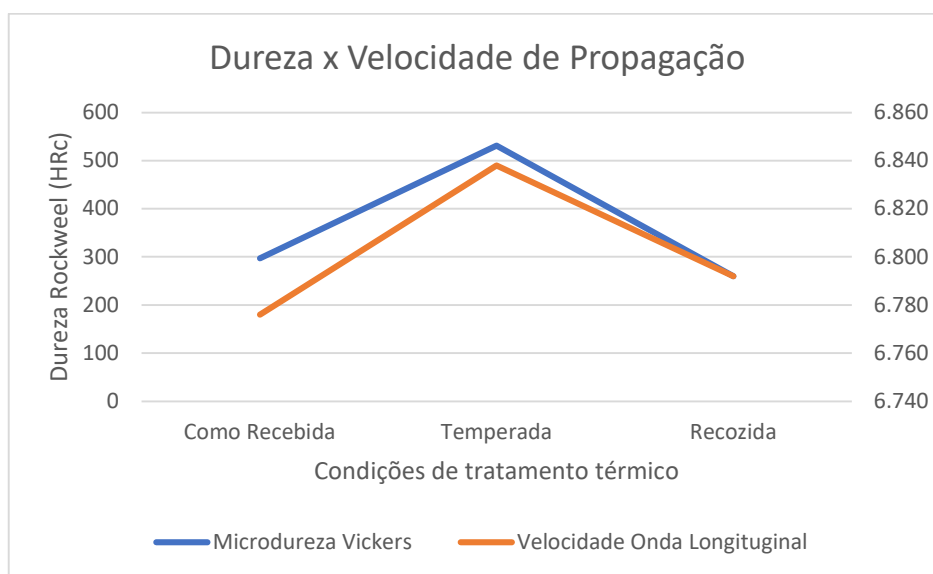


Figura 4-13 : Imagem correlacionando curvas de dureza e velocidade de propagação de ondas longitudinais

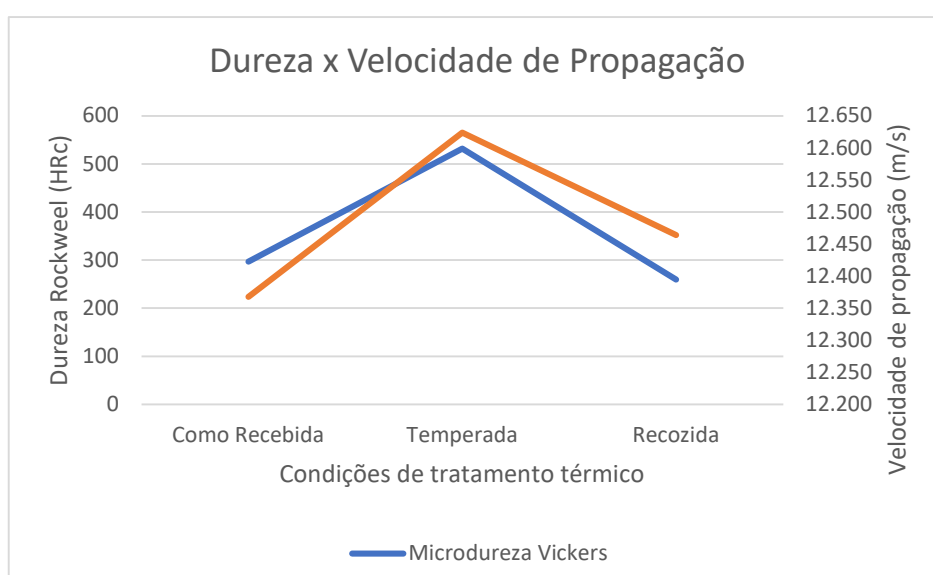


Figura 18 : Imagem correlacionando curvas de dureza e velocidade de propagação de ondas transversais

Em estudo realizado por CARREON *et. al* (2015) em aços API X60 e X65, estabeleceu-se uma correlação entre a velocidade ultrassônica e a dureza. A relação encontrada foi diretamente proporcional, ou seja, observou-se um aumento das medidas de velocidade de propagação com um aumento da dureza.

No entanto, foi pontuado pelo autor, que a melhor relação entre esses parâmetros deve ser avaliada em cada aço em específico, de forma que outro aço não mantenha a mesma correlação entre dureza e velocidade (CARREON *et. al*, 2015).

Em contrapartida, LUKOMSKY (2010) concluiu em seus estudos que a velocidade de propagação diminui com a dureza. No entanto, ele observa que é possível prever a dureza com base na velocidade de onda, mas isso requer relações separadas para diferentes tipos de aço, assim como afirma CARREON *et. al* (2015).

Também foi mostrado que para se obter uma relação eficaz entre dureza e velocidade ultrassônica, é necessário ter conhecimento da composição química, temperaturas de tratamento térmico, e se realizar ensaios com um certo campo amostral (LUKOMSKY, 2010).

No presente estudo, visivelmente observamos um acompanhamento das curvas, no entanto a dureza como recebida é inferior à dureza da amostra recozida, ao passo que a velocidade ultrassônica da amostra recozida é superior. Uma possível explicação para esse fato pode estar atrelada a um alívio nas tensões internas de forma a facilitar a propagação da frente sônica ao longo da microestrutura.

Busca-se também uma correlação entre os valores de dureza e atenuação. O gráfico apresentado na **Figura 4-15** apresenta comportamentos distintos para atenuação e dureza. Na amostra “CR”, por exemplo, observa-se um baixo valor de dureza, no entanto um alto valor de atenuação.

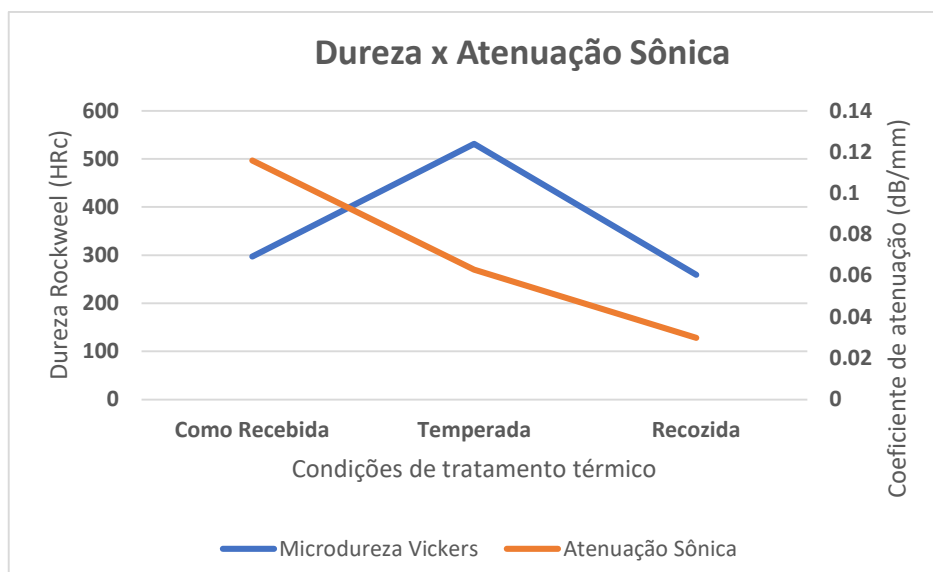


Figura 4-15 : Imagem correlacionando os valores de dureza e atenuação sônica

Para a amostra temperada, tem-se um aumento da dureza, acompanhado de um decréscimo da atenuação. Tratando-se de duas estruturas martensíticas, é uma análise interessante de se considerar.

Um aumento de dureza da amostra “CR” para a amostra “T”, como mencionado anteriormente, é esperado pois a primeira sofreu alívio de tensões internas e certa homogeneização. Em contrapartida, não é intuitivo associar o aumento de tensões internas, e provável aumento da densidade de discordâncias, com um decréscimo da atenuação sônica, uma vez que esse parâmetro está associado a diminuição da amplitude e perda de energia do feixe.

Ao compararmos a amostra “T” com a amostra “R”, voltamos a encontrar uma correlação entre o decréscimo da dureza e das tensões internas, com o decréscimo da atenuação.

No entanto, segundo TOOZANDEHJANI *et. al* (2015), a variação da atenuação é principalmente devido à dispersão da onda através dos grãos de material. Portanto, por mais que se possa estabelecer alguma relação entre tamanhos de grão, contornos de grão, inclusões e dureza, não necessariamente se pode estabelecer uma relação direta entre as medidas de dureza e atenuação, e sim correlações secundárias.

Portanto, seria necessário coletar mais medidas, valores de densidade de discordância, tamanho de grão, e tensão interna, para estabelecer, com mais precisão, uma relação entre os parâmetros.

4.4 PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS E O COEFICIENTE DE *POISSON*

Prosseguindo na correlação entre as propriedades mecânicas e as medidas ultrassônicas, é possível, a partir das velocidades, se estabelecer uma correlação entre as medidas obtidas no ensaio de ultrassom e o coeficiente de *Poisson*.

Conforme mencionado na seção “2.3.1.1 Velocidade” desse trabalho, KUMAR (2018), apresenta um novo parâmetro relacionado às medidas ultrassônicas o R_{uv} , calculado a partir da **Equação 2-3**. A **Tabela 4-4** apresenta os valores calculados desse parâmetro ultrassônico.

Tabela 4-4 : Parâmetros ultrassônicos incluindo R_{uv} (Adaptado de SILVA,2020).

Amostras (SAE 8630M2)	Velocidade		R_{uv}	Coeficiente de Poisson
	Onda Longitudinal (m/s)	Onda Transversal (m/s)		
Como Recebida	6,776 ± 0,001	12,368 ± 0,008	1.825	0,285 ± 0,001
Temperada	6,838 ± 0,003	12,624 ± 0,019	1.846	0,290 ± 0,005
Recozida	6,792 ± 0,003	12,464 ± 0,011	1.835	0,288 ± 0,001

Segundo KUMAR (2018), para materiais isotrópicos a razão de velocidades aumenta à medida que as velocidades aumentam, a medida que o mesmo parâmetro é inversamente proporcional ao coeficiente de *Poisson*.

No entanto, se observa que pelos resultados que o R_{uv} aumenta à medida que também aumenta o coeficiente de *Poisson*, por exemplo, a amostra temperada, contém a maior razão de velocidades e o maior coeficiente de *Poisson*,

A justificativa que KUMAR (2018) dá para essa inversão é a presença de trincas, poros ou aplicação de pressão. Nesse sentido, uma possível justificativa para os valores obtidos, pode estar associada às condições de processamento do material recebido.

5 CONCLUSÕES

O estudo aqui apresentado não permitiu concluir diretamente que exista uma correlação direta entre o feixe ultrassônico e a microestrutura do material. No então foram observados fortes indícios da possibilidade de estabelecer essa relação.

Como as interações entre o feixe ultrassônico e as microestruturas estudadas se mostraram complexas, envolvendo várias variáveis relacionadas ao histórico térmico e de processamento das amostras, mais ensaios devem ser realizados a fim de determinar a presença ou não dessa relação.

O uso da densidade de discordâncias como ferramenta de correlação do feixe ultrassônico com a microestrutura se mostrou promissor, uma vez que seu valor seja sensivelmente diferente entre as amostras em estudo, para casos em que as diferenças sejam menores mais estudo devem ser realizados.

6 TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se outras condições de tratamentos térmicos nas amostras. Como por exemplo a aplicação do tratamento térmico de revenimento à diferentes temperaturas, como 200°C, 400°C e 640°C. Dessa forma, seria possível avaliar influência da temperatura de revenimento nos valores de atenuação sônica. Assim, para o mesmo tipo de microestrutura, considerando diferentes temperaturas, espera-se estabelecer de forma mais assertiva uma correlação entre atenuação e tratamento térmico.

Sugere-se também o uso do microscópio eletrônico de varredura para melhor caracterização da microestrutura de forma a ter uma avaliação mais precisa das fases presentes, sobretudo devido a falta de resolução para a análise por microscopia ótica, sobretudo em microestruturas refinadas como no caso deste trabalho.

Nesse sentido, é de ganho significativo a utilização de técnicas de EBSD para determinar a densidade de discordância de todas as amostras em análise, uma vez que, como mencionado nesse trabalho, esse parâmetro tem grande potencial de utilização na correlação entre as propriedades mecânicas e microestruturais e as medidas de ultrassom, especialmente a atenuação. É necessário, entretanto, realizar uma rotina adequada de preparação das amostras, para se obter resultados mais assertivos na análise por EBSD.

REFERÊNCIAS

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por Ultrassom**. Jun. / 2018 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, 2018.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 5L**: Specification for Line Pipe. Exercício de 2012.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 6A**: Wellhead and Tree Equipment. Exercício de 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook**, Vol. 1: Heat Treating. 9th ed., 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook**, Vol. 4: Heat Treating. 9th ed., 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO E INSPEÇÃO. **Ensaios Não Destrutivos e Inspeção**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>>>. Acesso em 8 jan. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384-17**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. Exercício: 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E407**: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. Exercício: 2015.

BAI, Yong. **Pipelines and Risers**. 1. ed. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2001.

BARRA, Felipe; GONZALEZ, Rodrigo Espinoza; FERNANDEZ, Henry; LUND, Fernando; MAUREL, Agnes; PAGNEUX, Vincent. The Use of Ultrasound to Measure Dislocation Density. **JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society**, v. 67, p. 1856–1863, 2015

BERGNER, F.; KOHLER, B.; POPP, K. The Role of Microstructure in the Propagation of Ultrasound in Bainitic Low-Alloy Steels. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 55, p. 251-260, 1993

CALLISTER JR., W. D.; Rethwisch, D. G. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 8th ed., John Wiley & Sons, Inc., Danvers, 2010.

CANTARIN, Tadeu Noveli. **Caracterizações mecânicas e microestruturais do aço AISI 8630 modificado revestido com a liga de níquel 625 por soldagem “GTAW”**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Autarquia associada a Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

CARREON, H.; BARRETA, G.; NATIVIDAD, C; SALAZAR, M.; CONTRERAS, A. Relation between hardness and ultrasonic velocity on pipeline steel welded joints. **Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 31, p. 97-108, 2015.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4^a ed., Editora Blucher., São Paulo, 2008.

COSTA, Vagner Machado. **Caracterização mecânica e metalúrgica de juntas dissimilares de aços de alta resistência e baixa liga**. 2011. 66 f. Trabalho de diplomação – Departamento de metalurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

DAI, Tao; LIPPOLD, John C.. Tempering effect on the fusion boundary region of alloy 625 weld overlay on 8630 steel. **Welding in the world**, v. 62, p. 535-550, 2018

DUARTE, Saulo Moretti Araújo. **Caracterização do aço AISI 8630M amantegado com arame ER80S-D2 pelo processo de soldagem “MAG”**. 2014. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2014.

FREITAS, Vera Lúcia de Araújo de. **Avaliação da potencialidade das técnicas de ultra-som na caracterização de aços AISI e aço inoxidável duplex**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Escola de Lorena da Universidade de São Paulo. Lorena, 2013.

JUNIOR, Jaime Casanova Soeiro; ROCHA, David Bellentani; BRANDI, Sérgio. Uma Breve Revisão Histórica do Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo (SP), v.18, p. 176-195, 2013

KUMAR, Anish. Ultrasonic Velocity Ratio: An Effective Tool for In-Situ Materials Characterization. **Acta Acustica United With Acustica**, v. 104, p. 251-258, 2018.

KUMAR, Anish; JAYAKUMAR, T.; RAJ, Baldev; RAY; K.K. Characterization of solutionizing behavior in VT14 titanium alloy using ultrasonic velocity and attenuation measurements. **Materials Science and Engineering**, v. A360, p. 58-64, 2003.

LUKOMSKI, T; STEPINSKI, T. Steel hardness evaluation based on ultrasound velocity measurements. **Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, v. 52, p. 952-956, 2010

MONTE, Isabel Rocha do. **Caracterização microestrutural do aço API 5L X65 soldado por feixe de elétrons com diferentes aportes térmicos**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

NANEKAR, P.P; SHAH, B.K. Characterization of material properties by ultrasonics. **Journal of Non-Destructive Testing & Evaluation**, v. 1, p. 13-23, 2004.

OLIVEIRA, George Luiz Gomes de. **Soldagem dissimilar AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas**. 2013. 228 f. Tese (Doutorado) – Centro de tecnologia – Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais – Programa de pós-graduação em engenharia e ciência dos materiais. Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2013.

PICKERING, F. B., **Physical Metallurgy and the Design of Steels**. Applied Science Publishers Ltd., London, 1978. p. 60-88.

SANTIN, Jorge Luiz. **Ultra-som Técnica e Aplicação**. 2 ed. Curitiba: Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO
DEPARTAMENTO DE INFORMAÇÕES E ESTUDOS ENERGÉTICOS. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2018: Edição de Maio de 2019**. Brasília – DF, 2019.

SILVA, Francisco Carlos Nipo da. **Caracterização das propriedades mecânicas de aço baixa liga por meio de medidas ultrassônicas**. 2020. 52 f. Proposta de Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET-RJ. Rio de Janeiro, 2020.

SIQUEIRA, Natalie Chaves de. **Caracterização do estado de envelhecimento de um aço hp por ensaio não destrutivo de ultrassom**. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

TOOZANDEHJANI, Meysam; MATORI, Kahmirul Amim; OSTOVAN, Farhad; MUSTAPHA, Faizal; ZAHARI, Nur Ismarrubie; OSKOUEIAN, Arshin . On the correlation between microstructural evolution and ultrasonic properties: a review. **J Mater Sci**, v. 50, p. 2643-2665, 2015.