

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

**FREDERICO GUIMARÃES FERNANDES  
HUGO LODI DE MORAES MALHEIROS DE CARVALHO  
PEDRO BARBOSA RIBEIRO CORDEIRO**

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO USI-  
SAR-80T POR MEIO DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RIO DE JANEIRO**

**2025**

**FREDERICO GUIMARÃES FERNANDES  
HUGO LODI DE MORAES MALHEIROS DE CARVALHO  
PEDRO BARBOSA RIBEIRO CORDEIRO**

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO USI-  
SAR-80T POR MEIO DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Humberto Nogueira Farneze

Co-orientador: Prof. Francisco Carlos Nipo da Silva

**RIO DE JANEIRO**

**2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

F363 Fernandes, Frederico Guimarães  
Caracterização das propriedades mecânicas do Aço USI SAR-80t por meio de medidas ultrassônicas / Frederico Guimarães Fernandes, Hugo Lodi de Moraes Malheiros de Carvalho [e] Pedro Barbosa Ribeiro Cordeiro – 2025.  
60f.: il. color. , enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.

Bibliografia: f. 57-60.

Orientador: Humberto Nogueira Farneze.

Co-orientador: Francisco Carlos Nipo da Silva.

1. Engenharia mecânica. 2. Aço – Tratamento térmico.  
3. Ultrassom. I. Carvalho, Hugo Lodi de Moraes Malheiros de.  
II. Cordeiro, Pedro Barbosa Ribeiro. III. Farneze, Humberto Nogueira (Orient.). IV. Silva, Francisco Carlos Nipo da (Co-orient.). V. Título.

CDD 620.1



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Este momento não seria possível sem o apoio, incentivo e dedicação de muitos.

Em primeiro lugar, agradecemos às famílias, base fundamental de nossas vidas, pelo amor incondicional, paciência e compreensão durante todos os momentos de desafios e conquistas. Vocês são nossa maior inspiração e motivação.

Aos amigos, que estiveram ao lado nos momentos de descontração e nas horas mais difíceis, oferecendo palavras de encorajamento e apoio. Vocês tornaram essa jornada mais leve e significativa.

Aos professores Humberto Nogueira Farneze e Francisco Carlos Nipo da Silva, nossos sinceros agradecimentos pela orientação, sabedoria e dedicação ao longo deste processo. Seus conhecimentos, críticas construtivas e estímulo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Somos imensamente gratos pela paciência e disponibilidade em compartilhar suas experiências.

À instituição Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), que nos proporcionou uma formação de excelência e um ambiente propício para o crescimento acadêmico e pessoal. Agradecemos por todo o suporte e pelos recursos disponibilizados, que foram fundamentais para a conclusão deste projeto.

Por fim, agradecemos a todos os demais professores, colegas e profissionais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada um de vocês deixou uma marca importante nesta trajetória.

## RESUMO

CORDEIRO, P.; FERNANDES, F., CARVALHO, H. **Caracterização das propriedades mecânicas do aço USI-SAR-80T por meio de medidas ultrassônicas**. 2025. 60 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

Este trabalho apresenta a caracterização das propriedades mecânicas do aço USI-SAR-80T por meio de medidas ultrassônicas, visando validar a correlação entre técnicas não destrutivas e ensaios mecânicos convencionais. O USI-SAR-80T, pertencente à classe dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), possui amplas aplicações em estruturas que exigem elevada resistência mecânica e durabilidade. Para a investigação, amostras foram analisadas em duas condições: como recebido e tratadas termicamente por têmpera. Foram realizados ensaios de dureza, análise microestrutural por microscopia ótica e medições ultrassônicas utilizando o método de imersão com transdutores de feixe focalizado. Observou-se por meio deste trabalho uma correlação direta entre a dureza das amostras e as velocidades das ondas longitudinais, bem como uma correlação inversa com as ondas transversais. Além disso, observou-se que a atenuação ultrassônica aumentou com a dureza do material, reforçando a influência da microestrutura na propagação das ondas. Desta forma, os resultados encontrados mostraram que o ensaio de ultrassom figura como uma possível alternativa para análises do comportamento mecânico e microestrutural deste aço ARBL.

**Palavras-chave:** USI-SAR-80T. Microestrutura. Comportamento mecânico. Ultrassom.

## ABSTRACT

CORDEIRO, P.; FERNANDES, F., CARVALHO, H. **Characterization of the Mechanical Properties of USI-SAR-80T Steel Using Ultrasonic Measurements.** 2025. 60 p. Completion of Course Work - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

This study presents the characterization of the mechanical properties of USI-SAR-80T steel using ultrasonic measurements, with the aim of validating the correlation between non-destructive techniques and conventional mechanical tests. USI-SAR-80T, which belongs to the high-strength, low-alloy (HSLA) steel class, has wide applications in structures that require high mechanical strength and durability. The investigation involved the analysis of samples under two conditions: as received and after heat-treatment by quenching. The experimental program included hardness tests, microstructural analysis by optical microscopy, and ultrasonic measurements employing the immersion method with focused beam transducers. The findings of the study demonstrated a direct correlation between the hardness of the samples and the velocities of the longitudinal waves, as well as an inverse correlation with the transverse waves. Furthermore, it was observed that ultrasonic attenuation increased with material hardness, thereby reinforcing the influence of microstructure on wave propagation. Consequently, the results demonstrated that ultrasound testing is a viable alternative for analyzing the mechanical and behavior of this HSLA steel.

**Keywords:** USI-SAR-80T. Microstructure. Mechanical behavior. Ultrasound.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Microscopia eletrônica de varredura de uma estrutura do tipo martensítica. Ataque: Nital 2%.....	16
Figura 2.2 - Gráfico esquemático de laminação controlada aplicada em aços HSLA-80 .....	18
Figura 2.3 - Gráfico esquemático de laminação controlada aplicada em aços HSLA-80 .....	26
Figura 2.4 - Partículas de uma onda transversal.....	27
Figura 2.5 - Cristais Piezoelétricos .....	30
Figura 3.1 - Detalhes da junta soldada para retirada de parte do metal base. (a) Largura de 64 mm e (b) Comprimento total do metal base em cada lado da junta – 133 mm. ...	33
Figura 3.2 - Posição da retirada das amostras no metal base da junta soldada .....	35
Figura 3.3 - Configuração do ensaio de Ultrassom .....	41
Figura 4.1- Imagem resultante da microscopia ótica da amostra como recebida. Microestrutura composta por martensita revenida. Ataque com nital 2%. Aumento de 500x. ....	45
Figura 4.2- Imagem resultante da microscopia ótica da amostra temperada. Microestrutura composta por martensita. Ataque com nital 2%. Aumento de 500x. ....	46
Figura 4.3 - Resultados do ensaio de dureza para cada condição das amostras .....	48
Figura 4.4 - Imagem representando o sistema do ensaio contendo as duas amostras, o transdutor e o termômetro.....	49
Figura 4.5 - Representação gráfica correlacionando as curvas de velocidade de propagação de ondas longitudinais com dureza das amostras.....	51
Figura 4.6 - Representação gráfica correlacionando as curvas de velocidade de propagação de ondas transversais com dureza das amostras .....	51
Figura 4.7 - Imagem correlacionando as curvas de atenuação sônica com dureza das amostras.....	52
Figura 4.8 - Imagem correlacionando as curvas de velocidade de propagação de ondas longitudinais com atenuação sônica.....	53
Figura 4.9 - Imagem correlacionando as curvas de velocidade de propagação de ondas transversais com atenuação sônica. ....	53

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química de aços ARBL.....	14
Tabela 2.2 - Características do tratamento térmico de revenimento em diferentes faixas de temperatura.....	17
Tabela 2.3 Propriedades mecânicas básicas do aço SAR 80T.....	20
Tabela 3.1 - Composição química do metal de base analisado, conforme certificado da Usiminas (% em peso). (%Fe em balanço).....	34
Tabela 3.2 - Dimensões das amostras para as análises experimentais.....	35
Tabela 3.3 - Propriedades do transdutor.....	41
Tabela 4.1 - Resultado dos ensaios de dureza realizados nas amostras. ....	47
Tabela 4.2 - Valores de velocidades de onda ultrassônica, atenuação de sinal e coeficiente de Poisson. ....	50

## **LISTA DE SIGLAS**

ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
HSLA	High Strength Low Alloy
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ASTM	American Society for Testing and Materials
SMAW	Shielded Metal Arc Welding

## **LISTA DE ACRÔNIMOS**

NUCLEP	Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A.
END	Ensaio Não Destrutivo
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
TOF	Time of Flight

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 AÇOS ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).....	14
2.2 AÇOS TEMPERADOS E REVENIDOS.....	15
2.3 LAMINAÇÃO CONTROLADA EM AÇOS .....	17
2.4 ASPECTOS GERAIS DO AÇO SAR-80T.....	19
2.5 TEORIA DA ELASTICIDADE E CONSTANTES ELÁSTICAS.....	20
2.6 ULTRASSOM.....	23
2.6.1 Princípios Básicos .....	23
2.6.2 Propagação de Ondas Mecânicas Em Um Sólido.....	24
2.6.3 Tipos de Ondas Ultrassônicas .....	25
2.7 COMPORTAMENTO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS.....	27
2.7.1 Reflexão e Transmissão.....	27
2.7.2 Lei De Snell.....	28
2.7.3 Conversão de Modo .....	29
2.8 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA DE UM MEIO PARA OUTRO.....	29
2.9 ATENUAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS .....	31
2.9.1 Atenuação Devido à Absorção .....	31
2.9.2 Atenuação Devido à Dispersão.....	31
2.9.3 Atenuação Devido à Refração e Reflexão.....	32
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
3.1 MATERIAL .....	33
3.2 CORTE DAS AMOSTRAS .....	34
3.3 FRESAMENTO DE DUAS SUPERFÍCIES.....	36
3.4 TRATAMENTO TÉRMICO .....	36
3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	37
3.6 ENSAIOS MECÂNICOS.....	37
3.6.1 Ensaio de Dureza.....	38
3.6.2 Norma utilizada .....	39
3.7 MEDIDAS DE ULTRASSOM.....	40
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>44</b>
4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	44
4.1.1 Amostra como recebida.....	44
4.1.2 Amostra temperada.....	45

4.2 ENSAIO DE DUREZA .....	46
4.3 ENSAIO DE ULTRASSOM.....	48
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS .....	50
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>55</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A relevância da escolha dos materiais na atualidade se faz cada vez mais necessária, levando em perspectiva suas diferentes combinações de fatores como propriedades mecânicas, versatilidade, aplicação e custo. Nesse cenário, se destaca o aço USI SAR 80T, que é um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), sendo amplamente utilizado em aplicações onde a combinação de alta resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão é essencial. O USI SAR 80T possui uma composição química e um processo de tratamento térmico específicos, que conferem propriedades superiores de resistência e tenacidade, especialmente em ambientes subaquáticos. A sua capacidade de suportar pressões elevadas e resistir a impactos torna-o ideal para aplicações no setor naval e de defesa (DA FONSECA, 2016).

Além de seu uso na indústria de defesa, o aço USI SAR 80T também encontra aplicação em diversas indústrias civis e de infraestrutura. Por exemplo, é utilizado na construção de plataformas offshore, onde as condições operacionais exigem materiais que possam suportar ambientes marinhos severos e evitar falhas catastróficas. A resistência do USI SAR 80T à propagação de trincas por fadiga também o torna adequado para pontes e outras grandes estruturas civis, onde a segurança e a durabilidade a longo prazo são fundamentais. A capacidade de soldagem deste aço permite que ele seja trabalhado em projetos complexos, garantindo que as junções permaneçam robustas sob tensões elevadas (DA FONSECA, 2016).

O desenvolvimento contínuo de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), como o USI SAR 80T também impulsiona a inovação em materiais de engenharia. A busca por aços com melhores propriedades mecânicas e maior eficiência de produção leva ao desenvolvimento de variantes e substitutos. Estes aços oferecem vantagens em termos de peso e custo, mantendo ou até melhorando a resistência e a durabilidade. Portanto, os estudos e análises dos aços ARBL não só atendem às necessidades imediatas da validação de aplicações seguras em projetos críticos, mas também contribuem para avanços tecnológicos na ciência dos materiais e na engenharia estrutural.

Nos últimos anos, os avanços nas técnicas de ensaios não destrutivos (END) tornaram as inspeções ultrassônicas mais acessíveis, flexíveis e eficazes, revolucionando diversas indústrias. A utilização dessas técnicas é particularmente essencial, pois permitem avaliar a integridade estrutural dos aços de maneira mais precisa e eficiente. As inspeções ultrassônicas possibilitam a identificação de descontinuidades, que não são visíveis a olho nu. Além disso, esses métodos permitem determinar propriedades mecânicas cruciais dos materiais, como a resistência, a elasticidade e a tenacidade (FREITAS, 2012).

A capacidade do ultrassom de detectar e caracterizar defeitos precocemente é fundamental para prevenir falhas catastróficas em componentes estruturais, que podem levar a perdas financeiras e acidentes. Além disso, a utilização de técnicas ultrassônicas contribui para a otimização dos processos produtivos. Ao monitorar continuamente a qualidade dos materiais durante a fabricação, é possível realizar ajustes em tempo real, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência, sem contar que, sendo um ensaio não destrutivo, a perda de material ao realizar o ensaio é evitada. Essa abordagem melhora significativamente a qualidade final dos produtos.

Em geral, a evolução das técnicas de ensaios não destrutivos, especialmente as inspeções ultrassônicas, desempenham um papel crucial na indústria metalúrgica. Elas não apenas garantem a qualidade e a confiabilidade dos aços, mas também contribuem para a eficiência produtiva e a sustentabilidade.

Este trabalho tem como objetivo o estudo de correlação entre a dureza e os aspectos microestruturais do aço ARBL USI-SAR-80T, nos estados como fornecido pelo fabricante (temperado e revenido) e submetido ao tratamento térmico de têmpera, com propriedades resultantes de medidas ultrassônicas. O intuito do estudo é apresentar uma alternativa para análise dessas propriedades com a utilização de ensaios não destrutivos em campo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AÇOS ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)

É possível notar uma crescente requisição dos materiais utilizados para aplicações industriais de características que os adaptem melhor às suas propostas, como aços com alta resistência, com melhoria considerável da tenacidade, alta soldabilidade e ductilidade. Sob essa perspectiva, foram implementados os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL).

Chiaverini (2005) descreve que o objetivo desses aços é alcançar uma alta relação de resistência à tração junto com boa soldabilidade, melhores propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão atmosférica. Para isso, elementos específicos são incorporados à sua composição conforme as faixas apresentadas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Composição química de aços ARBL.**

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Quantidade (%)</b>
Al	0 a 0,20
B	0 a 0,005
C	0,06 a 0,28
Cr	0 a 0,005
Cu	0 a 1,80
Mn	0,35 a 1,60
Mo	0 a 0,65
Nb	0 a 0,10
P	0,01 a 0,12
S	0 a 0,03
Si	0,01 a 0,90
Ti	0 a 0,05
Zr	0 a 0,12

**Fonte: Usiminas, 2015**

O objetivo da adição de diferentes elementos de liga como o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio, é alterar diretamente as propriedades dos aços ARBL, como o incremento da resistência e o aperfeiçoamento da tenacidade à medida que o seu teor de carbono é diminuído gradualmente (BRAZ, 1999). É importante reiterar que essas melhorias nas propriedades desses aços são feitas com pequenas quantidades de elementos de liga, podendo conter por volta de cinco desses elementos com variações nos teores.

## 2.2 AÇOS TEMPERADOS E REVENIDOS

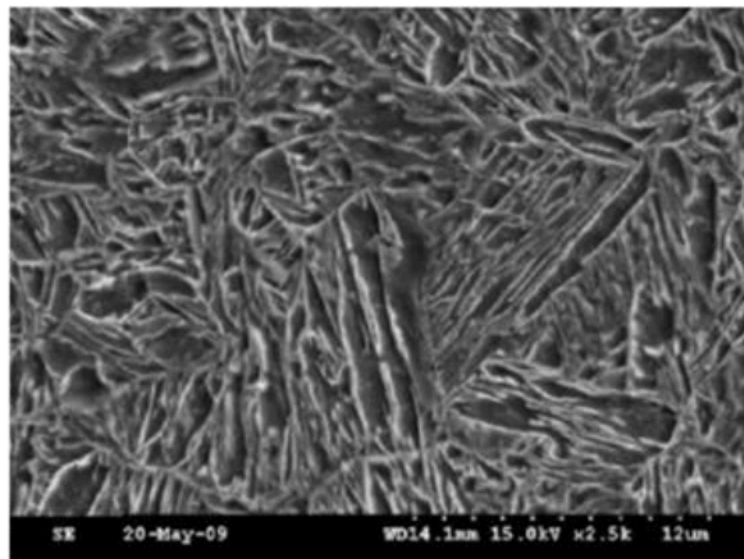
Atualmente, cada vez mais propriedades específicas de materiais, como as dos aços, têm sido demandas para atender as necessidades tecnológicas das indústrias. Aços que oferecem combinações de resistência a tração, tenacidade e ductilidade respondendo de forma adequada às cargas e deformações ou até mesmo aços com excelente resistência mecânica com peso consideravelmente menor como os Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL).

Para que os aços alcancem tais combinações de propriedades de forma controlada, é necessário submeter o material ao processo de tratamento térmico, que pode ser definido como um conjunto de operações que envolve aquecimento, manutenção a uma temperatura específica e resfriamento sob condições controladas de tempo, atmosfera, e velocidade de aquecimento e resfriamento. O objetivo dessas operações é alterar as propriedades do material, com todo o processo ocorrendo no estado sólido (XAVIER, 2016).

Dentre os diversos tipos de tratamentos térmicos, um de forte relevância é a têmpera, a qual consiste no aumento de dureza e a resistência mecânica do material com o seu aquecimento acerca de 50°C acima da sua temperatura crítica e em seguida faz-se o resfriamento em meios como água, óleo, salmoura ou até mesmo ao ar atmosférico. O intuito deste tratamento é a obtenção do constituinte martensita (CHIAVERINI, 2005). O resfriamento do aço a partir do campo austenítico com altas taxas de resfriamento

conseguem impedir a difusão atômica, como, por exemplo, nas transformações de austenita-ferrita, austenita-perlita e austenita-bainita (BHADESHIA, 2006).

Após esse processo, devido à martensita, o aço adquire uma microestrutura com maior dureza e elevada resistência mecânica, porém com baixa tenacidade e ductilidade limitadas (SANTOS e HENRIQUES, 2015; FADARE et al., 2011). Dessa forma, é realizado o tratamento térmico de revenimento, uma vez que sua aplicação é feita com o intuito de reduzir os problemas associados à têmpera, como tensões internas e irregularidades na dureza e fragilidade do material, além de melhorar a ductilidade e a resistência ao impacto. O tratamento consiste no aquecimento do material com o objetivo de converter a martensita, que possui uma estrutura tetragonal de corpo centrado, para uma estrutura cúbica de corpo centrado, mais estável nas condições de temperatura e pressão do tratamento. Esse processo ajuda a aliviar tensões internas e permite a formação de precipitados de carbonetos, que se agrupam de acordo com a temperatura e a duração do tratamento. Obtém-se como constituinte a martensita revenida, a qual se apresenta com morfologias típicas de ripas conforme apresentado na Figura 2.1. A Tabela 2.2 apresenta algumas características adquiridas conforme a faixa de temperatura do tratamento de revenimento.



**Figura 2.1- Microscopia eletrônica de varredura de uma estrutura do tipo martensítica. Ataque: Nital 2%.**

**Fonte: Wang et al., 2010**

**Tabela 2.2 - Características do tratamento térmico de revenimento em diferentes faixas de temperatura**

Faixa de temperatura (°C)	Características	Dureza (HRc)
25 - 100	Segregação de carbono em discordâncias	Afeta pouco
100 - 250	Precipitação de carboneto de ferro tipo epsilon – $Fe_2 - 4C$	Até 60
200 - 300	Transformação da austenita em ferrita e cementita	Pouco menor que 60
250 - 350	Formação de um carboneto metaestável – $Fe_5C_2$	Pouco maior que 50
400 - 600	Aglomeração de $Fe_3C$ na forma esferoidal	25 – 45
500 – 600	Precipitação de carboneto de liga (Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W)	-
600 - 700	Cementita na forma esferoidal – Material muito tenaz	5 - 20

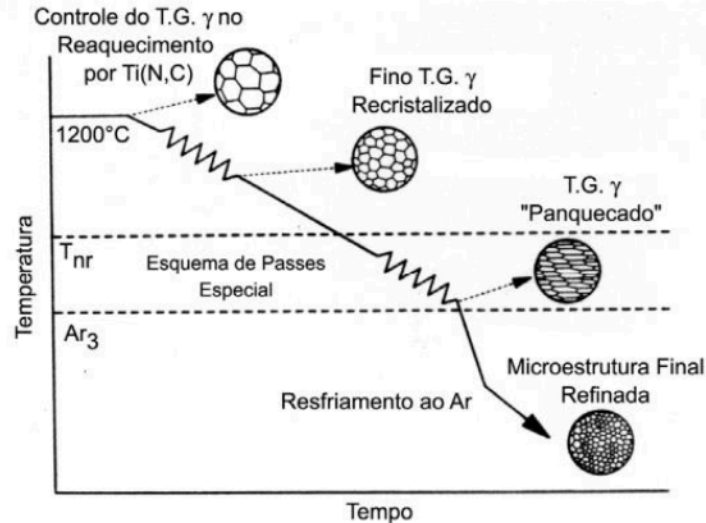
**Fonte: Adaptado de Maciel, 2016**

### 2.3 LAMINAÇÃO CONTROLADA EM AÇOS

Dentro dos métodos existentes para promover um aumento das diferentes propriedades mecânicas dos aços microligados, pode-se destacar a laminação controlada. Esse processo pode ser avaliado como o controle preciso da temperatura de forma simultânea à redução de espessura do material proveniente dos passes dados, com sua temperatura de acabamento definida (SILVA, 2009). Segundo Núñez (2006), esse processo não só é capaz de gerar o aumento de resistência mecânica para aços com teores equivalentes de elementos de liga, mas garante também boa soldabilidade e tenacidade.

De acordo com Silva (2009), a partir da deformação dos grãos de austenita que ocorre ao longo do processo de laminação, tem-se como produto grãos de ferrita finos no resfriamento. Isso possibilita a melhoria na tenacidade e soldabilidade, e principalmente o aumento da resistência mecânica devido a combinação de diferentes

mecanismos de endurecimento (NÚÑEZ, 2006). A Figura 2.2 a seguir mostra, de forma esquemática, o processo de laminação controlada.



**Figura 2.2 - Gráfico esquemático de laminação controlada aplicada em aços HSLA-80. Fonte: Gorni, 2003.**

Gorni (2003) descreve de forma detalhada as etapas que ocorrem no processo descrito acima. Em um primeiro instante, é promovido o reaquecimento do material sob altas temperaturas (em torno de 1200°C) capaz de dissolver os carbonitretos de nióbio. Nessa etapa é fundamental que os grãos de austenita sejam menores e uniformes. Logo em seguida, com o objetivo de manter os grãos austeníticos refinados e recristalizados, o material é deformado ainda em altas temperaturas, em uma faixa onde ocorre sua rápida recristalização.

De forma análoga, a etapa seguinte é descrita pelo alongamento da austenita devido a deformação proveniente dos passes do processo, além do aumento da taxa de nucleação de ferrita nessa área que ocorre na região indicada por  $t_{nr}$ , onde a temperatura se encontra abaixo da temperatura de recristalização da austenita (LINS JUNIOR, 2013). Esse "achatamento" dos grãos austeníticos e a deformação da ferrita derivados da laminação nessa fase promove o aumento na resistência e tenacidade, com um material com microestrutura ferrítica-perlítica (NÚÑEZ, 2006).

## 2.4 ASPECTOS GERAIS DO AÇO SAR-80T

O aço SAR 80T é notoriamente conhecido como um material de alta resistência e baixa liga (ARBL), possuindo boa soldabilidade. O SAR 80T é frequentemente utilizado em estruturas onde a alta resistência é necessária, como em pontes, edifícios altos, veículos de transporte pesado, ou mesmo em setores de engenharia pesada. Ele é escolhido em projetos que exigem uma combinação de resistência à tração, durabilidade e capacidade de suportar ambientes rigorosos, principalmente em projetos de aplicação na indústria de defesa (SILVA BASTOS, 2007). Trata-se de um aço similar ao Aço ASTM A517 B/H com limite mínimo de escoamento de 700 MPa (DA FONSECA, 2016).

A análise microestrutural consiste na análise dos produtos metalúrgicos, através de microscópico, visando identificar as fases presentes, a granulação do material (tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões. O aço USI-SAR 80T pode apresentar uma microestrutura homogênea composta por ferrita e perlita levemente esferoidizada, martensita revenida e agregados eutetóides (DA FONSECA, 2016).

As propriedades mecânicas do SAR-80T, são resultantes de um processo de manufatura que incorpora, na rota de produção, a aplicação de conceitos como endurecimento por precipitação, refino de grão e adição de elementos microligantes associados a diferentes escalas de passes de temperatura de laminação (DA FONSECA, 2016).

Em específico ao aço USI-SAR 80T, a obtenção de alta resistência mecânica conjugada com a boa tenacidade e soldabilidade, é obtida submetendo o aço, durante o processo de fabricação, à tratamento térmico de têmpera por cortina d'água a 900°C, seguido de revenimento na faixa de 600 ou 680°C (DA FONSECA, 2016). A Tabela 2.3 apresenta as propriedades mecânicas básicas o aço SAR 80T.

Tabela 2.3 Propriedades mecânicas básicas do aço SAR 80T

Valores Requeridos			
Escoamento (LE) (MPa)	Limite de Ruptura (LR) (MPa)	Elasticidade %	CHARPY -10° Transversal ao sentido de laminação Joule
≥700 mín.	760 ~ 960	≥16	≥27

Fonte: Adaptado de Usiminas, 2015

## 2.5 TEORIA DA ELASTICIDADE E CONSTANTES ELÁSTICAS

A Teoria da Elasticidade é um ramo da mecânica dos sólidos que estuda o comportamento de materiais quando submetidos a forças e deformações, desde que essas deformações sejam reversíveis, ou seja, o material retorna à sua forma original após a remoção da carga. No contexto de materiais como o aço SAR 80T, essa teoria é fundamental para prever como o material responderá a diferentes tipos de cargas, como tensões de tração, compressão ou cisalhamento (HIBBELER, 2004).

A teoria da elasticidade se baseia, em parte, na Lei de Hooke, que afirma que a deformação de um material é proporcional à tensão aplicada, dentro do limite elástico do material (HIBBELER, 2004). A relação básica é dada pela Equação 2.1.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.1)$$

Onde:

- $\sigma$  : Tensão (stress) aplicada ao material,
- $E$  : Módulo de elasticidade (ou módulo de Young),
- $\epsilon$  : Deformação (strain) resultante.

Essa relação é válida enquanto o material está no regime elástico, ou seja, não sofre deformações permanentes (HIBBELER, 2004).

A Equação 2.1 representa a equação da porção inicial em linha reta do diagrama tensão-deformação até o limite de proporcionalidade. Além disso, o módulo de elasticidade representa a inclinação dessa reta (HIBBELER, 2004).

O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que indica a rigidez de um material. Materiais muito rígidos, como o aço, têm grandes valores de  $E$ , ao passo que materiais esponjosos, como a borracha vulcanizada, podem ter valores mais baixos. O módulo de elasticidade é uma das propriedades mecânicas mais importantes utilizadas no desenvolvimento de equações que tratam da teoria da elasticidade. Porém, é válido ressaltar que  $E$  só pode ser usado se um material tiver comportamento linear elástico. Além disso, se a tensão no material for maior que o limite de proporcionalidade, o diagrama tensão-deformação deixa de ser uma linha reta, e a Equação 2.1 deixa de ser válida (HIBBELER, 2004).

Quando uma carga é aplicada a uma barra, provoca uma mudança  $\delta$  no comprimento e  $\delta'$  no raio da barra. As deformações na direção longitudinal ou axial e na direção lateral ou radial podem ser visualizadas na Equação 2.2 e na Equação 2.3, respectivamente (HIBBELER, 2004).

$$\epsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_{lat} = \frac{\delta'}{r} \quad (2.3)$$

Onde:

- $\epsilon_{long}$  : Deformação na direção longitudinal ou axial
- $\epsilon_{lat}$  : Deformação na direção lateral ou radial
- $\delta$  : Alteração no comprimento da barra
- $\delta'$  : Alteração no raio da barra
- $L$  : Comprimento da barra
- $r$  : Raio da barra

No início do século XIX, o cientista francês S. D. Poisson percebeu que, dentro da faixa elástica, a razão entre essas deformações é uma constante, visto que  $\delta$  e  $\delta'$  são

proporcionais. Essa constante é denominada coeficiente de Poisson,  $\nu$  (nu), e seu valor numérico é único para um determinado material homogêneo e isotrópico. A Equação 2.4 mostra a constante em termos matemáticos (HIBBELER, 2004).

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (2.4)$$

Ocorre um sinal negativo porque o alongamento longitudinal (deformação positiva) provoca contração lateral (deformação negativa) e vice-versa. (HIBBELER, 2004).

O módulo de cisalhamento é outra constante elástica que relaciona a tensão de cisalhamento aplicada a um material com a deformação de cisalhamento resultante (HIBBELER, 2004). Ele é dado pela Equação 2.5.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.5)$$

Onde:

- $G$  : Módulo de cisalhamento
- $E$  : Módulo de elasticidade (ou módulo de Young)
- $\nu$  : Coeficiente de Poisson

O módulo de compressibilidade volumétrica do material, ou módulo de Bulk é uma medida da resistência de um material à compressão uniforme. Essa constante pode ser descrita pela Equação 2.6 (BEER e JOHNSTON, 2015).

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.6)$$

Onde:

- $K$  : Módulo de compressibilidade volumétrica (ou módulo de Bulk)
- $E$  : Módulo de elasticidade (ou módulo de Young)
- $\nu$  : Coeficiente de Poisson

Dessa forma, a teoria da elasticidade, aplicada ao aço SAR 80T, fornece uma base para analisar e prever o comportamento do material sob diferentes condições de carga, utilizando as constantes elásticas como o módulo de Young, coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento, e módulo de compressibilidade. Essas constantes são fundamentais no projeto e na análise de estruturas e componentes feitos desse aço, garantindo que eles desempenhem de forma segura e eficiente em suas respectivas aplicações.

## 2.6 ULTRASSOM

### 2.6.1 Princípios Básicos

Um ensaio não destrutivo (END) é uma técnica utilizada para inspecionar, testar e avaliar materiais, componentes ou estruturas sem causar danos ou alterar suas propriedades físicas. Os objetivos desse tipo de ensaio são detectar defeitos, medir características como espessura ou integridade estrutural, e assegurar a qualidade de um produto sem comprometer sua funcionalidade.

Dentre os exemplos de END's mais conhecidos, é possível citar o ensaio de Ultrassom. O Ultrassom é um método para inspecionar materiais e estruturas internas por meio de ondas sonoras de alta frequência (ANDREUCCI, 2024). Essas ondas são enviadas para o material e, ao encontrar descontinuidades como trincas ou inclusões, são parcialmente refletidas de volta. Um transdutor capta essas ondas refletidas, permitindo análises aprofundadas sobre o material. Como todo ensaio não destrutivo, esse ensaio visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais.

As primeiras aplicações da energia sônica para atravessar materiais metálicos foram feitas em 1929, pelo cientista Sokolov. Já em 1942, Firestone, utilizou o princípio da ecosonda ou ecobatímetro, para exames de materiais e somente em 1945 o ensaio ultrassônico começou a ser utilizado em escala industrial, tendo como motivação as

necessidades e responsabilidades cada vez maiores. Hoje, na indústria moderna, principalmente nas áreas de caldeiraria e estruturas marítimas, o exame ultrassônico, constitui uma ferramenta indispensável para garantia da qualidade de peças. Na maioria dos casos, os ensaios são aplicados em aços-carbonos, em menor porcentagem em aços inoxidáveis. Materiais não ferrosos são difíceis de serem examinados, e requerem procedimentos especiais (ANDREUCCI, 2024).

### 2.6.2 Propagação de Ondas Mecânicas Em Um Sólido

A propagação de ondas mecânicas em um sólido envolve a movimentação das partículas do material em resposta a uma força externa, transmitindo energia através do meio. Ela ocorre através da transferência de energia entre essas partículas, que vibram em resposta a uma perturbação. Esse processo é governado por diferentes mecanismos, dependendo do tipo de onda e das propriedades do material (KINSER, 2000).

Para entender como ocorre essa transferência de energia entre as partículas, é necessário entender os conceitos de frequência, comprimento de onda e impedância acústica, que juntos determinam como as ondas se comportam ao interagir com o material e suas características internas.

A frequência de uma onda mecânica ( $f$ ) é definida como o número de oscilações completas que ocorrem no tempo de um segundo. A unidade “ciclos por segundos” é normalmente conhecida por “Hertz”, abreviatura “Hz”. Esse conceito está relacionado a quantidade de energia transportada, uma vez que quanto maior a frequência, maior será a energia que ela carregará e menor será o comprimento de onda, tornando a onda mais sensível às imperfeições do material. Ensaios de ultrassom utilizam-se de altas frequências, acima de 20.000 Hertz (Hz), para a realização da inspeção do material (SHULL, 2002).

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é a distância entre dois pontos idênticos em ciclos consecutivos de uma onda, como o pico de uma onda e o pico seguinte ou o vale de uma onda e o vale seguinte. Esse conceito determina como será a interação da onda com as características físicas do sólido, como poros ou tamanhos de grão.

Como já explicado, a frequência de uma onda e seu comprimento são inversamente proporcionais. Os conceitos são relacionados através da velocidade da onda ( $v$ ), através da Equação 2.7.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.7)$$

Já a impedância acústica ( $Z$ ) é uma propriedade que relaciona a pressão sonora aplicada à velocidade da partícula em uma onda sonora. Ela pode ser classificada como a resistência que o meio faz à onda acústica que se propaga. Essa propriedade determina como a onda será refletida ou transmitida quando encontra uma interface entre dois materiais diferentes e a diferença de impedância entre dois materiais determina a quantidade de energia refletida. Uma grande diferença de impedância resultará em maior reflexão, enquanto uma menor diferença permitirá mais transmissão da onda (SHULL, 2002). Esse conceito está relacionado com a densidade do material ( $\rho$ ) e é definido pela Equação 2.8.

$$Z = \rho v \quad (2.8)$$

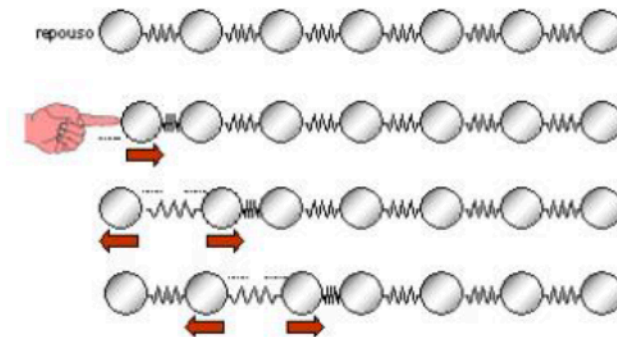
Em resumo, a propagação de ondas mecânicas em sólidos é um processo complexo que envolve a interação das partículas do material através de forças elásticas, com comportamento influenciado por fatores como o tipo de onda, a velocidade de propagação, e as características do material.

### 2.6.3 Tipos de Ondas Ultrassônicas

O teste ultrassônico de materiais é feito com o uso de ondas mecânicas propagadas em um meio. Qualquer uma dessas ondas mecânicas é composta de oscilações de partículas no meio em que se propagam. A passagem de energia no meio faz com que as partículas que o compõe executem o movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio, cuja amplitude de movimento será diminuída com o tempo, em

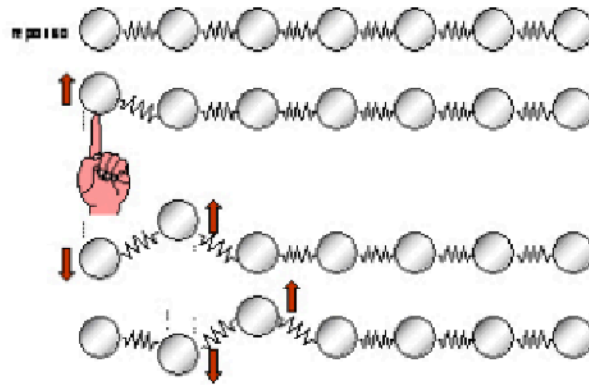
decorrência da perda de energia adquirida pela onda. Segundo Andreucci (2024), uma vez que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem são rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, então podemos classificar as ondas acústicas.

O primeiro tipo, conhecidas como ondas longitudinais são ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação da onda. Esse movimento gera uma tensão periódica de compressão e refração das partículas (HULL e JOHN, 1988). Desta forma, as partículas em todo o meio elástico vibram na mesma direção de propagação da onda, como demonstrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Partículas de uma onda longitudinal.**  
Fonte: Andreucci, 2024.

Já as ondas transversais, são ondas cujas partículas vibram na direção perpendicular ao de propagação. Esse movimento gera uma tensão de cisalhamento associada ao movimento da partícula (HULL e JOHN, 1988). Os planos de partículas ficam na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente, como demonstrado na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Partículas de uma onda transversal.**  
**Fonte: Andreucci, 2024**

## 2.7 COMPORTAMENTO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

O ensaio por ultrassom consiste em introduzir um feixe sônico de alta frequência no material, que será refletido por interfaces. As reflexões são detectadas, sendo feita uma análise para determinar a presença e a localização dessas interfaces. Descontinuidades, que geram uma interface sólido gás de fácil detecção, podem ser detectadas por ultrassom (KRAUTKRAMER, 1990).

### 2.7.1 Reflexão e Transmissão

Previamente citado, o fenômeno da reflexão pode ser definido como o encontro de uma onda ultrassônica com um obstáculo ou superfície, onde parte da energia da onda é refletida de volta. A quantidade de reflexão depende das propriedades do material e da diferença da impedância acústica entre o meio e o obstáculo onde a onda se propaga. Se uma onda encontra uma interface entre dois materiais com diferentes densidades, uma parte pode ser refletida, enquanto o restante será transmitido.

Já no fenômeno da transmissão, parte da energia da onda passa através do obstáculo ou superfície, movendo-se para o novo meio. A eficiência desse fenômeno depende da compatibilidade acústica entre os meios, onde a diferença entre as impedâncias acústicas definirá se a maior parte da onda será refletida ou transmitida (KINSER, 2000).

### 2.7.2 Lei De Snell

Formulada pelo matemático holandês Willebrord Snellius em 1621, a Lei de Refração, ou Lei de Snell, descreve como as ondas ultrassônicas se refratam quando passam de um meio para outro, com diferentes índices de refração. Este princípio é crucial para entender como a direção das ondas muda ao atravessar diferentes materiais (HECHT, 2016).

A lei relaciona os índices de refração dos meios ( $n_1$  e  $n_2$ ) e os ângulos de incidência ( $\theta_1$ ) e refração ( $\theta_2$ ) das ondas, através da Equação 2.9.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.9)$$

Segundo Hecht (2016), quando uma onda passa de um meio com índice de refração menor para um meio com índice de refração maior, a onda se refrata em direção à normal da superfície. Entretanto, quando o contrário acontece, a refração também acontece na direção contrária, ou seja, ao lado oposto da normal.

A Lei de Snell é fundamental para a interpretação de dados em ensaios ultrassônicos, visto que é usada para calcular como as ondas se desviam ao encontrar defeitos no material, permitindo aos técnicos ajustarem o equipamento, ajustando o ângulo do transdutor e otimizando a detecção e interpretação da precisão e profundidade dos defeitos. Além disso, a Lei de Refração ajuda a compensar variações nas impedâncias acústicas das camadas do material, assegurando dados mais precisos (KINSER et al., 2000).

### 2.7.3 Conversão de Modo

Uma vez que o conceito da Lei de Snell é compreendido, entende-se como será o comportamento refratário de uma onda mecânica ao passar de um meio para outro, entretanto ainda é necessário compreender o que seria a refração em si.

De acordo com Krautkramer (1990), quando uma onda incide em um meio através de um ângulo  $\theta_1$ , ela será refletida e transmitida. As ondas transmitidas, nesse caso, serão chamadas de ondas refratadas, porque mudarão de direção em relação com a direção de incidência. Dessa forma, a nova direção da onda dependerá dos materiais dos meios e do ângulo de incidência da onda. Simultaneamente, a diferença nas propriedades elásticas entre os dois meios pode causar a conversão de modo. Por exemplo, uma onda longitudinal que incide em um ângulo em uma interface pode gerar uma onda refratada que é uma combinação de uma onda longitudinal e uma onda transversal no segundo material. Assim, a transformação de um tipo de onda ultrassônica em outro tipo é chamada conversão de modo.

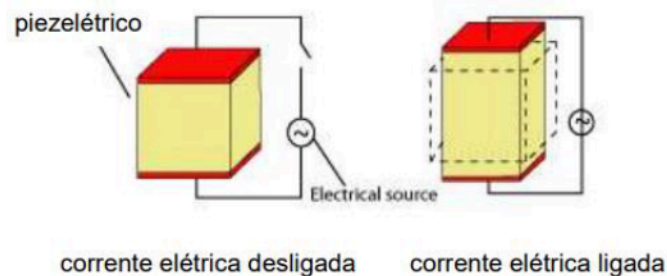
Em um ensaio ultrassônico não destrutivo, ao enviar uma onda ultrassônica através de uma peça que possui diferentes camadas de materiais, a onda pode se refratar e ao mesmo tempo converter-se de um tipo para outro ao cruzar as interfaces entre esses materiais. Esse comportamento é usado para identificar e caracterizar descontinuidades ou defeitos internos, como fissuras ou inclusões (KRAUTKRAMER, 1990).

## 2.8 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA DE UM MEIO PARA OUTRO

As ondas ultrassônicas são geradas ou introduzidas no material por meio de um elemento emissor, que possui uma determinada dimensão e vibra a uma certa frequência. Este emissor pode ter diferentes formas, como circular ou retangular. Esses elementos, tanto o emissor quanto o receptor são chamados de transdutores (ANDREUCCI, 2024).

Alguns materiais como cristais ou cerâmicas são capazes de gerar uma carga elétrica ao serem submetidos a uma pressão. Esse efeito é chamado de efeito piezoelétrico. Nesses materiais, esse efeito também funciona de forma inversa. Ao aplicar um campo elétrico, eles se comportam como se estivessem sobre pressão, ou seja, alteram suas dimensões físicas.

Os cristais que apresentam esse efeito, chamados de cristais piezoelétricos, são capazes de transformar energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica. Essa transformação ocorre se forem aplicados eletrodos, com uma tensão elétrica alternada na ordem de centenas de Volts, no cristal piezoelétrico. Dessa forma, o cristal se contrai e se estende ciclicamente, como mostrado na Figura 2.5. Se for aplicada uma força tentando impedir o movimento de ocorrer, a placa transmitirá esforços de compressão as zonas adjacentes, emitindo assim uma onda longitudinal, cuja forma depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal.



**Figura 2.5- Cristais Piezoelétricos.**  
**Fonte: Andreucci, 2024**

Ainda segundo Andreucci (2024), os materiais que compõem os cristais piezoelétricos são o quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o metaniobato de chumbo e o zirconato-titanato de chumbo. Dentre os materiais piezoelétricos, titanato de Bário e zirconato-titanato são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de quartzo.

Para a inspeção ultrassônica, são importantes a potência de emissão e a sensibilidade da recepção. A frequência ultrassônica gerada pelo cristal dependerá da

sua espessura (cerca de 1 mm para 4 MHz e 2 mm para 2 MHz). Os cristais são montados sobre o bloco amortecedor, junto com os eletrodos, e a carcaça externa constituem o transdutor ou cabeçote propriamente dito.

## 2.9 ATENUAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

De acordo com Ensminger e Bond (2017), a atenuação de ondas ultrassônicas é um fenômeno que afeta a propagação e a detecção dessas ondas em diferentes meios. Esse fenômeno é definido como a diminuição da intensidade das ondas ultrassônicas à medida que elas viajam através de um material, podendo ser causada por diversos mecanismos como a absorção, a dispersão e a reflexão. Compreender os mecanismos de atenuação permite otimizar o uso das ondas ultrassônicas para obter medições e imagens mais precisas e confiáveis. Em inspeções industriais, a atenuação pode afetar a detecção de defeitos internos e a interpretação dos resultados.

### 2.9.1 Atenuação Devido à Absorção

A atenuação das ondas ultrassônicas devido a absorção, sendo esse um dos principais mecanismos de atenuação, ocorre quando há a conversão de energia em calor, causado por interações moleculares e viscosidade do meio. A quantidade de absorção é diretamente proporcional à frequência da onda ultrassônica, ou seja, quanto maior a frequência da onda, mais rápida será a absorção (ENSMINGER e BOND, 2017).

### 2.9.2 Atenuação Devido à Dispersão

Ao encontrar heterogeneidades no meio, como a presença de partículas, as ondas ultrassônicas são espalhadas em diferentes direções. Esse fenômeno, chamado

de dispersão, pode reduzir a intensidade das ondas na direção original e afetar a clareza das imagens obtidas em métodos de ultrassonografia e inspeção de materiais (ENSMINGER e BOND, 2017).

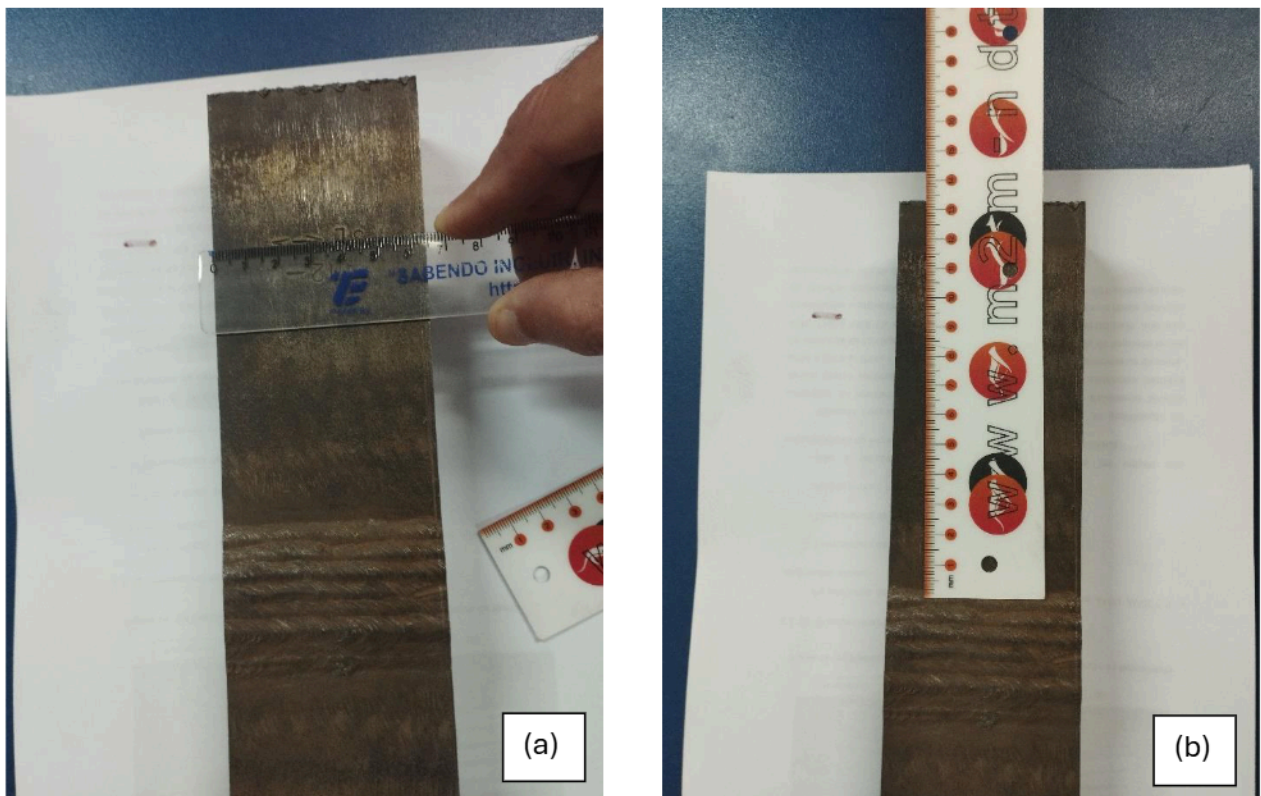
### 2.9.3 Atenuação Devido à Refração e Reflexão

Como já discutido anteriormente, quando as ondas ultrassônicas encontram uma interface entre dois meios com diferentes propriedades acústicas, parte da energia é refletida de volta e parte é refratada, mudando a direção das ondas. Enquanto a reflexão pode causar perda de intensidade se a onda refletida não chegar ao receptor, a refração pode alterar o caminho das ondas, complicando a interpretação dos dados obtidos. Esses fenômenos são fundamentais em técnicas de imagem ultrassonográfica e na detecção de falhas em materiais (ENSMINGER e BOND, 2017).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

Este trabalho utilizou o aço ARBL USI SAR 80T, fabricado pela USIMINAS, sendo retirado do metal base de uma junta soldada pelo processo SMAW, que foi disponibilizada pela empresa NUCLEP (Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A.), com 25 mm de espessura (Figuras 3.1).



**Figura 3.1 - Detalhes da junta soldada para retirada de parte do metal base. (a) Largura de 64 mm e (b) Comprimento total do metal base em cada lado da junta – 133 mm.**

De acordo com o certificado do fabricante, a chapa de aço USI SAR-80T utilizada na soldagem desta junta, foi fornecida na condição de temperada e revenida, sendo que

o tratamento de tempera ocorreu a 910°C com 126 minutos de aquecimento e 30 minutos de encharque e o revenimento ocorreu a 600°C com 186 minutos de tempo de aquecimento e 30 minutos de encharque. Apresenta limite de escoamento de 778 MPa, limite de resistência de 869 MPa e alongamento de 20%. A Tabela 3.1 mostra a composição química do material, conforme certificado do fabricante.

**Tabela 3.1 - Composição química do metal de base analisado, conforme certificado da Usiminas (% em peso). (%Fe em balanço)**

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
0,13	0,26	1,01	0,020	0,002	0,039	0,01	0,004	0,036	0,014	0,66	0,01	0,54

É importante destacar os elementos-chave como o Cromo (Cr), presente em teor de 0,66% e o Molibdênio (Mo), com 0,54%. Esses elementos contribuem significativamente para a resistência mecânica e a estabilidade térmica do material. Por outro lado, os baixos teores de Fósforo (P) e Enxofre (S) refletem a alta qualidade metalúrgica, minimizando fragilidades que poderiam comprometer o desempenho do aço.

### 3.2 CORTE DAS AMOSTRAS

Com o objetivo de adequar o material às condições propostas pelo estudo, as amostras foram cortadas a uma distância de aproximadamente 80 mm da zona termicamente afetada (ZTA) da junta soldada, conforme mostrado na Figura 3.2, viabilizando a realização dos ensaios de dureza, ultrassonografia e microscopia ótica. O corte foi planejado de forma a garantir que as dimensões e a integridade das superfícies das amostras fossem apropriadas para cada tipo de ensaio, minimizando danos que pudessem comprometer os resultados. Na Tabela 3.2 são apresentadas as dimensões das amostras brutas geradas.



**Figura 3.2 - Posição da retirada das amostras no metal base da junta soldada.**

**Tabela 3.2 - Dimensões das amostras para as análises experimentais.**

<b>Amostra</b>	<b>Dimensões (mm)</b>	<b>Finalidade Experimental</b>
Como recebida	25 x 25 x 10	Microscopia ótica
Para tratamento térmico	25 x 25 x 10	Microscopia ótica
Como recebida	64 x 50 x 25	Dureza / Ultrassom
Para tratamento térmico	64 x 50 x 25	Dureza / Ultrassom

O planejamento do corte levou em consideração não apenas as dimensões necessárias para cada ensaio, mas também a uniformidade das superfícies e a orientação do material. Essas precauções foram fundamentais para assegurar que os resultados dos ensaios refletissem com precisão as propriedades do material em estudo.

### 3.3 FRESAMENTO DE DUAS SUPERFÍCIES

Após o processo de corte, foi realizado, nas duas amostras destinadas aos ensaios de dureza e ultrassom, o fresamento das duas superfícies. Realizando esse processo, foi possível garantir que as superfícies de teste estivessem planas, homogêneas e livres de imperfeições que poderiam interferir nos resultados dos ensaios. O processo de usinagem antecedeu a etapa do tratamento térmico aplicado.

### 3.4 TRATAMENTO TÉRMICO

Para fins de estudo, foi realizado um tratamento térmico de têmpera em duas das quatro amostras, para modificar suas propriedades mecânicas e avaliar o impacto da alteração microestrutural no comportamento do material.

Esse tratamento térmico é um processo que envolve o aquecimento do material a uma temperatura elevada, seguida de resfriamento rápido em um meio. Ele visa aumentar a dureza e a resistência mecânica do material, promovendo a transformação da estrutura cristalina do aço, particularmente a formação de martensita, que é uma fase de alta dureza.

A têmpera foi realizada em um forno tipo mufla, no Laboratório de Soldagem do CEFET/RJ (LASOL) com as amostras submetidas a um aquecimento de 900 °C e mantidas nessa temperatura por uma hora. Após esse tempo, as amostras foram resfriadas rapidamente em água. Esse processo proporciona o aumento da dureza e da resistência mecânica da amostra, alterando suas propriedades microestruturais para posterior análise.

A importância deste tratamento no contexto do trabalho é garantir que se obtenham diferentes condições microestruturais no material, permitindo a análise comparativa das propriedades mecânicas entre a amostra temperada e a como recebida. A variação nas propriedades resultantes do tratamento térmico pode ser correlacionada

com os resultados dos ensaios ultrassônicos (coeficiente de atenuação e coeficiente de Poisson), dureza e microscopia ótica, fornecendo uma caracterização mais completa do comportamento mecânico do aço USI-SAR-80T. Esse processo também ajuda a simular condições que o material pode enfrentar em aplicações reais, ampliando a compreensão do seu desempenho em diferentes estados térmicos.

### 3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural é uma etapa fundamental para entender as características de um material, como a distribuição de fases, tamanho de grão e possíveis heterogeneidades, que podem influenciar diretamente as propriedades mecânicas dele. No presente estudo, essa análise foi conduzida utilizando a técnica de Microscopia Ótica (MO) realizada no Laboratório de Materiais do CEFET/RJ (LAMAT).

A preparação das amostras consistiu na técnica convencional de lixamento e polimento mecânico, seguido do emprego de ataque químico com o reagente nital 2%. Essa técnica foi utilizada para identificar as fases presentes e avaliar a uniformidade da microestrutura do material nas condições "como recebido" e "tratado termicamente".

As informações obtidas a partir dessa técnica foi essencial para validar as propriedades mecânicas encontradas e a correlação entre os diferentes métodos de caracterização utilizados neste trabalho.

### 3.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos desempenham um papel fundamental na engenharia e ciência dos materiais, pois permitem avaliar as propriedades mecânicas dos materiais, como dureza, resistência mecânica, ductilidade e tenacidade. Esses testes são essenciais para compreender o comportamento dos materiais sob diferentes condições de carga e ambiente, assegurando que atendam aos requisitos de projeto e segurança

em aplicações industriais. Além disso, os ensaios mecânicos fornecem informações indispensáveis para a validação de métodos alternativos de caracterização, como técnicas não destrutivas, contribuindo para o avanço de tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

Neste trabalho, foi realizado o ensaio de dureza, visto que as demais propriedades já foram fornecidas no certificado do fabricante do material.

### 3.6.1 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza é realizado para medir a resistência de um material à deformação plástica localizada causada por uma carga aplicada. Existem diferentes métodos de ensaio, como Brinell, Rockwell e Vickers, cada um utilizando um tipo específico de penetrador e carga.

O ensaio de dureza foi realizado utilizando o método Rockwell na escala HRA (Hardness Rockwell A). Esse método emprega um penetrador de diamante cônico, que é pressionado contra a superfície do material. A profundidade da impressão permanente é medida, e o valor de dureza é determinado automaticamente pelo equipamento. Este método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade, rapidez e confiabilidade para avaliar materiais de alta dureza, como o aço temperado estudado neste trabalho.

A escala HRA foi selecionada por ser adequada para materiais com elevada resistência mecânica, fornecendo resultados precisos em superfícies tratadas termicamente. Além disso, as medidas obtidas nessa escala foram convertidas para a escala Brinell (HB). Essa abordagem foi escolhida para validar a relação entre propriedades mecânicas e parâmetros ultrassônicos, destacando a eficácia de técnicas não destrutivas na caracterização de materiais.

A partir disso, o ensaio de dureza foi realizado utilizando o durômetro WOLPERT DIA TESTOR 7551, pertencente ao Laboratório de Materiais do CEFET/RJ (LAMAT). Foram realizadas quatro medições de dureza em pontos espaçados da superfície de cada amostra, para garantir a precisão e evitar interferências entre as impressões. Os

valores obtidos foram utilizados para calcular a média e o desvio padrão, assegurando a representatividade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

### 3.6.2 Norma utilizada

Para este ensaio, foi utilizada a norma ASTM E18 (2024), amplamente aplicada para ensaios de dureza Rockwell, incluindo a escala HRA. A norma define os procedimentos para a realização do ensaio, abrangendo a escolha do penetrador (diamante cônico), a aplicação da carga (60 kgf) e a medição da profundidade da impressão deixada no material. Além disso, estabelece critérios de calibração do equipamento e requisitos ambientais para garantir precisão nos resultados.

Em relação ao tamanho das amostras, a norma recomenda que o material tenha espessura suficiente para evitar interferências devido à proximidade com a base do material. Para amostras como as utilizadas neste trabalho, é essencial que a superfície seja plana, lisa e livre de curvaturas que possam comprometer a medição. A espessura deve ser suficiente para garantir que a impressão do penetrador não exceda a profundidade crítica, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos.

Dessa forma, a amostra foi preparada por meio de um processo de lixamento utilizando lixas de granulação progressiva, com o auxílio de lixas d'água de granulometrias de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Esse processo de lixamento foi realizado para remover imperfeições e garantir uma superfície plana e uniforme. Após o lixamento, a amostra foi polida com pasta de diamante com granulometria de 6  $\mu\text{m}$ , a fim de alcançar um acabamento superfino, eliminando marcas de lixamento e assegurando uma superfície altamente polida, ideal para a realização do ensaio.

### 3.7 MEDIDAS DE ULTRASSOM

As técnicas ultrassônicas têm se consolidado como ferramentas indispensáveis na caracterização de materiais, especialmente em aplicações não destrutivas. Sua capacidade de medir propriedades elásticas, identificar descontinuidades internas e avaliar microestruturas faz com que sejam amplamente utilizadas em estudos avançados de engenharia.

Neste trabalho, o ultrassom foi empregado para determinar propriedades mecânicas do aço USI-SAR-80T. Usando as medidas de tempo das ondas transversais e longitudinais e relacionando-as com a espessura das amostras, é possível obter-se as velocidades transversal e longitudinal. Essas medidas de velocidade podem ser usadas para a obtenção do coeficiente de Poisson e do coeficiente de atenuação das ondas ultrassônicas. Essas grandezas, uma vez correlacionadas as propriedades mecânicas e análises microestruturais, podem ser usadas para validar a eficácia da técnica na caracterização do material.

A metodologia aplicada utiliza o método de imersão com transdutores de feixe focalizado, uma abordagem que oferece alta precisão na medição do tempo de percurso (TOF - Time of Flight) das ondas longitudinal e transversal. Esse método aproveita o fenômeno de conversão de modo, onde ondas incidentes em interfaces entre materiais de diferentes impedâncias geram ondas refratadas de diferentes tipos.

A escolha do método ultrassônico baseia-se em sua natureza não destrutiva, rapidez de execução e capacidade de avaliar materiais de diferentes geometrias e condições de superfície. No caso do aço estudado, essas características são fundamentais para correlacionar as propriedades elásticas com o comportamento mecânico e microestrutural do material.

Para o ensaio foi utilizado como ponto focal a interface água – metal, com uma distância focal de 3 polegadas. O transdutor escolhido foi o de referência IBMF152, presente no catálogo da NDT Systems (2021) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Propriedades do transdutor.

Frequência	Diâmetro do transdutor	Características	Tipo	Distância focal mínima	Distância focal máxima	Referência	Ângulo do feixe
15 MHz	0,25 polegadas	Alto ganho	B	0,5 polegadas	3 polegadas	IBMF152	90°

Fonte: Adaptado de NDT SYSTEMS, 2021

De acordo com o catálogo de transdutores da NDT Systems (2021), o transdutor selecionado faz parte de uma ampla gama de dispositivos de teste ultrassônicos oferecidos pela empresa, com certificação antes do envio e diferentes categorias, como contato, linha de atraso, duplo elemento, feixe angular, imersão e outros acessórios relacionados. A diversidade e a qualidade dos produtos apresentados no catálogo reforçam a relevância da escolha do transdutor em questão para o projeto ou estudo em desenvolvimento.

A partir dos parâmetros encontrados no catálogo, o ensaio foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Ultrassom do CEFET/RJ (LINUS). Foram feitas duas varreduras espaçadas em 0,5mm em cada amostra, considerando dois pontos por varredura. A Figura 3.3 mostra a configuração do ensaio das duas amostras, com mais detalhes.



Figura 3.3 - Configuração do ensaio de Ultrassom.

Uma vez que o ensaio foi realizado, é possível determinar a velocidade ultrassônica. Ela pode ser determinada a partir da divisão da distância percorrida pela onda ultrassônica, que é a espessura da peça, pelo tempo decorrido entre a emissão do sinal e o seu retorno à superfície (TOF – time of flight). A demonstração de como obter essa velocidade é representada pela Equação 3.1 (KUMAR, 2018).

$$V = \frac{2t}{TOF} \quad (3.1)$$

- $V$  é a velocidade ultrassônica e  $t$  corresponde à espessura da peça.

Uma vez que os parâmetros de velocidade transversal e longitudinal foram obtidos, torna-se possível determinar propriedades elásticas do material, como o coeficiente de Poisson. A determinação do coeficiente de Poisson é importante para correlacionar os resultados dos ensaios ultrassônicos com as propriedades mecânicas do material, ajudando a caracterizar sua rigidez e comportamento sob diferentes condições de carga. A Equação 3.2 demonstra como determinar essa propriedade.

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (3.2)$$

Onde:

- $\nu$ : Coeficiente de Poisson;
- $V_L$ : Velocidade longitudinal da onda;
- $V_T$ : Velocidade transversal da onda.

Pode-se concluir a partir da equação acima que a razão de velocidade ultrassônica varia inversamente ao coeficiente de Poisson. Assim, quanto maior for o

coeficiente de Poisson de um material, menor será a relação entre as velocidades ultrassônicas.

Além disso, segundo Freitas et al. (2012), é possível calcular a atenuação através da redução de amplitude do sinal ultrassônico e a quantificar utilizando o coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ). A medição do coeficiente de atenuação é importante porque ela fornece informações sobre a dissipação de energia das ondas ultrassônicas à medida que elas se propagam através do material. Esse coeficiente está diretamente relacionado à microestrutura do material, como a presença de defeitos, porosidade e a distribuição das fases. Quanto maior o coeficiente de atenuação, maior é a perda de energia das ondas ultrassônicas, o que pode indicar características como heterogeneidade e descontinuidade interna. A Equação 3.3 demonstra como determinar essa propriedade.

$$\alpha = \frac{20}{2x} \log \frac{A_0}{A_t} \quad (3.3)$$

- Onde  $x$  é a espessura e  $A_0$  e  $A_t$  são as amplitudes do primeiro e segundo sinais, respectivamente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta etapa tem como objetivo principal apresentar os resultados obtidos no trabalho referentes aos experimentos feitos no ambiente laboratorial do CEFET/RJ, envolvendo análise microestrutural, ensaio de dureza e ensaio de ultrassom.

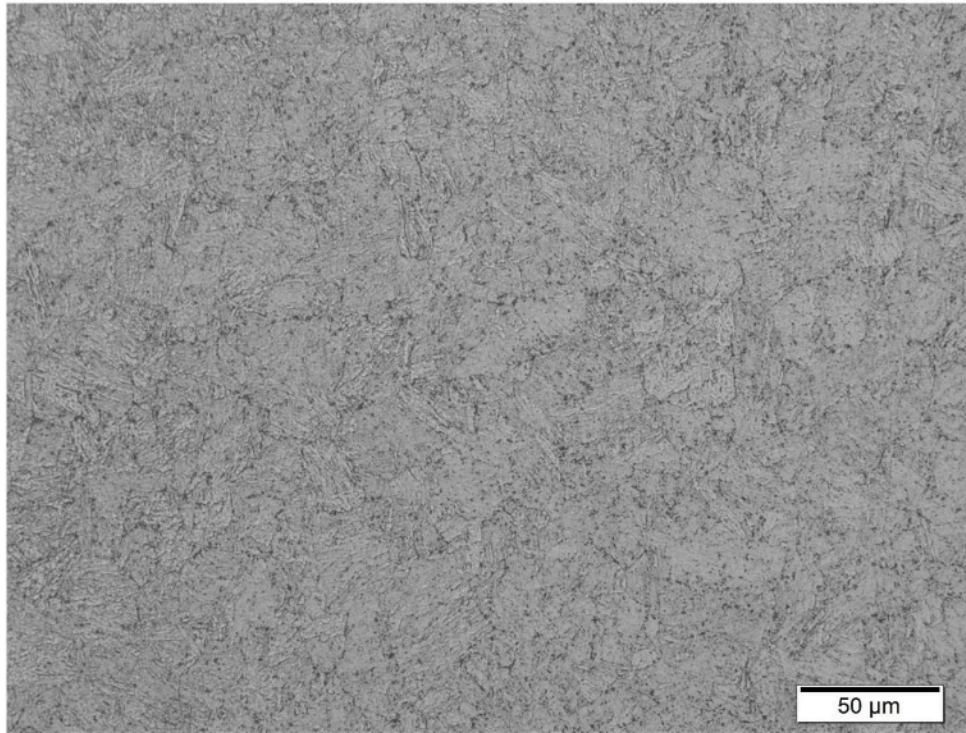
A partir dos resultados e da proposta do presente trabalho, foram estabelecidas correlações entre a propriedade mecânica de dureza do USI SAR 80-T e as propriedades associadas às medidas ultrassônicas, como as velocidades longitudinais e transversais e o coeficiente de atenuação. Foram considerados duas amostras com diferentes condições: Temperado e revenido para a amostra como recebida e pós-tratada termicamente pelo processo de austenitização a 900 °C seguido de têmpera em água para a amostra temperada.

### 4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A fim de complementar o estudo, conforme apresentado no item 3.5, foi realizada uma análise microestrutural utilizando microscopia ótica, de forma que fosse capaz de caracterizar a microestrutura das amostras nas condições aplicadas neste trabalho.

#### 4.1.1 Amostra como recebida

Conforme descrito no item 3.1, para o material como recebido foi realizado um tratamento térmico de têmpera e revenimento. A Figura 4.1 representa a imagem da microscopia ótica, que corrobora o que é previsto na literatura (ASM INTERNATIONAL, 1985), uma vez que é possível identificar uma microestrutura composta por martensita revenida.

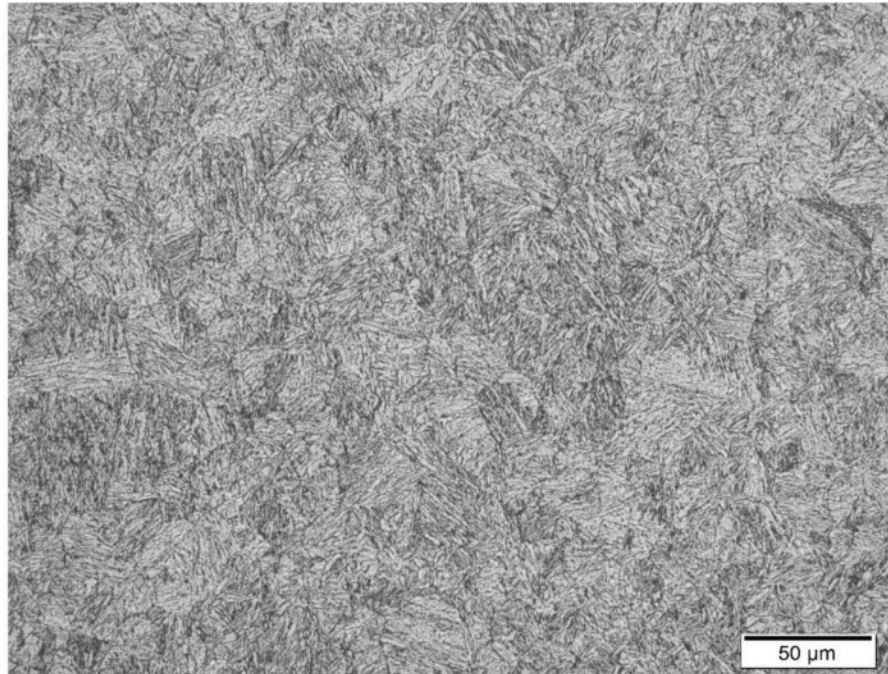


**Figura 4.1- Imagem resultante da microscopia ótica da amostra como recebida. Microestrutura composta por martensita revenida. Ataque com nital 2%. Aumento de 500x.**

A partir da Figura 4.1, que foi atacada com reagente nital 2%, observam-se traços de agulhas em uma microestrutura consistindo em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente dispersas, embutidas no interior de uma matriz contínua de ferrita (ASM INTERNATIONAL, 1985). A martensita revenida pode ser quase tão dura e resistente quanto a martensita, porém com uma ductilidade e uma tenacidade substancialmente aprimoradas (CALLISTER, 2002).

#### 4.1.2 Amostra temperada

Para a segunda amostra, que passou por um tratamento térmico de austenitização a 900 °C por uma hora seguido de têmpera em água, tem-se a Figura 4.2 indicando sua caracterização microestrutural, que é indicada pela literatura (ASM INTERNATIONAL, 1985), apresentando uma microestrutura totalmente martensítica.



**Figura 4.2- Imagem resultante da microscopia ótica da amostra temperada. Microestrutura composta por martensita. Ataque com nital 2%. Aumento de 500x.**

Pelo efeito do ataque com o reagente nital 2%, é possível visualizar na Figura 4.2 uma microestrutura tipicamente martensítica, com a identificação das agulhas bem definidas (ASM INTERNATIONAL, 1985).

#### 4.2 ENSAIO DE DUREZA

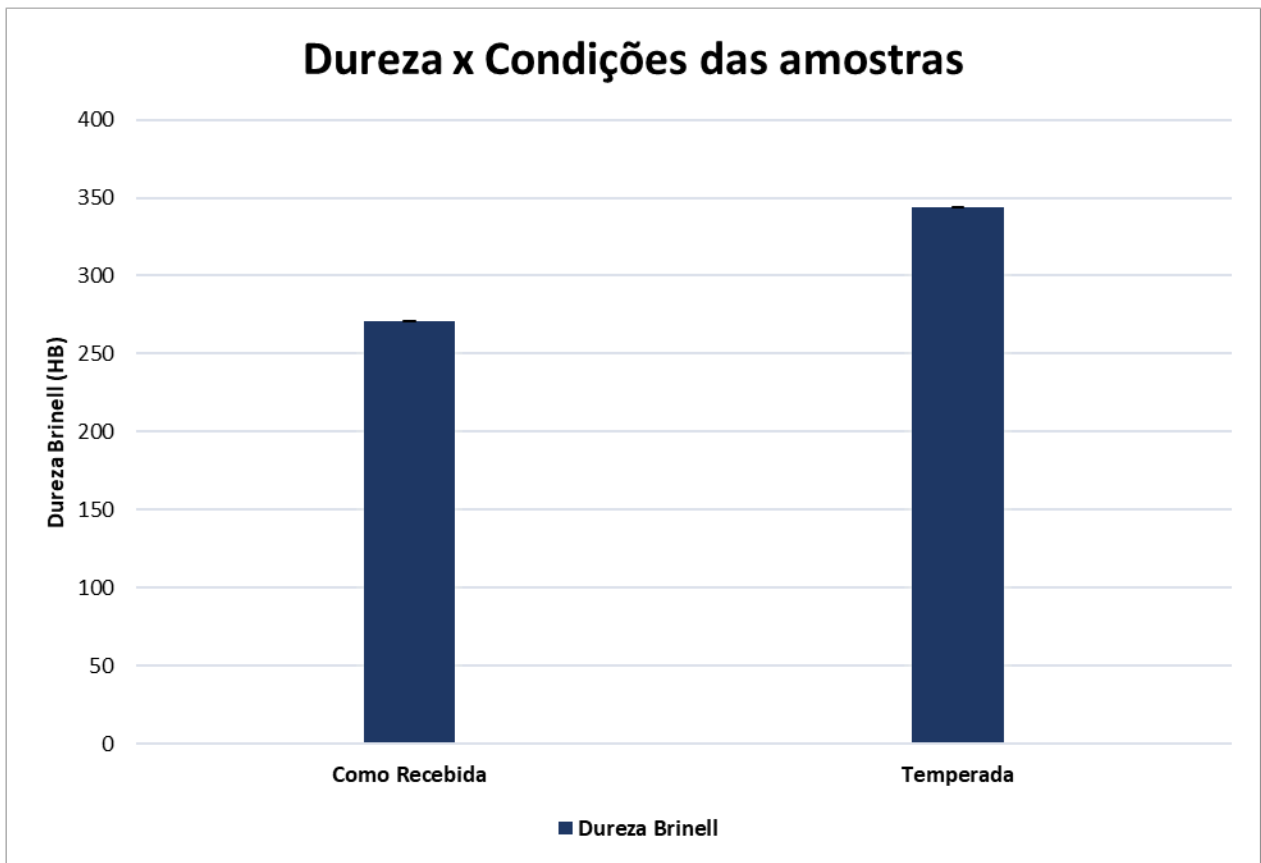
Como mencionado, as amostras foram submetidas aos ensaios de dureza pelo método Rockwell na escala A (HRA) ao longo da superfície das amostras, com 4 impressões em cada amostra, de acordo com a norma ASTM E18 (2024). A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos neste ensaio.

**Tabela 4.1 - Resultado dos ensaios de dureza realizados nas amostras.**

<b>Amostras</b>	<b>Dureza Rockwell A (HRA)</b>
Como Recebida	64,3 ± 0,1
Temperada	68,9 ± 0,3

Com base nisso, os resultados obtidos descrevem um comportamento esperado, uma vez que a amostra temperada apresenta maior valor de dureza frente à amostra como recebida. Pode-se justificar essa tendência devido à microestrutura do material, uma vez que, por apresentar uma microestrutura composta por martensita (Figura 4.2) devido à têmpera realizada.

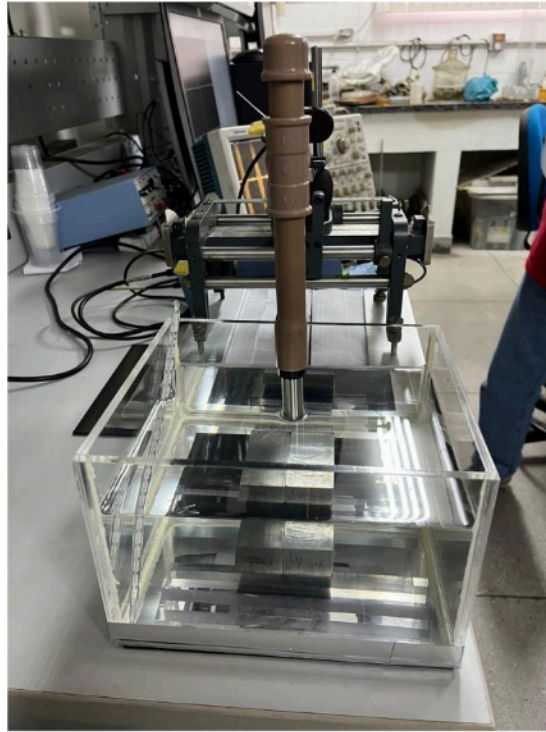
Para a amostra como recebida, por conta de seu revenimento pós-tempera, são apresentados valores de dureza reduzidos, tendo uma microestrutura composta por martensita revenida (Figura 4.1), como pontuado no item anterior. Para efeitos de comparação, a dureza medida em Rockwell A (HRA) foi convertida para dureza Brinell (HB). A Figura 4.3 fornece graficamente os resultados do ensaio para cada amostra em relação à sua dureza.



**Figura 4.3 - Resultados do ensaio de dureza para cada condição das amostras.**

### 4.3 ENSAIO DE ULTRASSOM

Para este ensaio, as duas amostras foram posicionadas em imersão no fluido, condicionadas a uma temperatura de 21 °C de modo a garantir a perpendicularidade entre elas a partir do feixe sônico, determinando um mesmo plano para suas superfícies (Figura 4.4). Foram consideradas duas varreduras para a obtenção dos sinais, com dois pontos em cada amostra, em um espaçamento de 0,5 mm entre eles. Ao todo, 4 pontos de sinais foram adquiridos para cada peça.



**Figura 4.4 - Imagem representando o sistema do ensaio contendo as duas amostras, o transdutor e o termômetro.**

Como produto do ensaio, foi possível obter os valores de tempo das ondas longitudinais e transversais, o valor da sua razão, que indica a relação entre a emissão do sinal e seu retorno (TOF – time of flight), e os valores de amplitude entre dois ecos de ondas longitudinais consecutivos. Com isso, foi possível determinar os valores de velocidades longitudinais e transversais para cada amostra, a partir da Equação 3.1, apresentada no item 3.7, além dos coeficientes de atenuação do sinal ultrassônico e o coeficiente de Poisson, obtidos pela Equação 3.3 e Equação 3.2, respectivamente, como apresentados na Tabela 4.2 a seguir.

**Tabela 4.2 - Valores de velocidades de onda ultrassônica, atenuação de sinal e coeficiente de Poisson.**

Amostras	Velocidades		Coeficiente de Atenuação (dB/mm)	Coeficiente de Poisson
	Onda Longitudinal (m/s)	Onda Transversal (m/s)		
Como Recebida	5911,5 ± 9,6	3257,6 ± 3,5	0,107 ± 0,001	0,281 ± 0,001
Temperada	5929,5 ± 5,8	3203,1 ± 15,8	0,188 ± 0,001	0,293 ± 0,002

De acordo com Santin (2003), é possível estabelecer uma relação direta entre a velocidade de propagação do feixe ultrassônico e a homogeneidade da microestrutura do material. Apoiando-se nisso, a partir dos valores de velocidades das diferentes ondas e do coeficiente de atenuação, foi possível estabelecer uma correlação do comportamento desses parâmetros frente à microestrutura das amostras, resultante das condições impostas a cada uma delas. É possível observar que as velocidades de propagação das ondas transversais apresentam um aumento com o decréscimo do coeficiente de Poisson (KUMAR, 2018).

#### 4.4 COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS

Esta seção tem como foco o tratamento dos dados medidos pelos diferentes ensaios de dureza e ultrassom, correlacionando esses tópicos e realizando uma análise de cada comportamento. Foi citado anteriormente o conceito da relação direta entre a microestrutura do material e a velocidade de propagação do ultrassom.

Um estudo realizado por Carreon et al. (2015) foi capaz de demonstrar essa relação em aços API X60 e X65, porém os autores pontuam a necessidade de estudos de casos específicos para cada tipo de aço, uma vez que eles não mantêm a correlação.

A partir dessa perspectiva, a Figura 4.5 e a Figura 4.6 são capazes de demonstrar o comportamento para as amostras do estudo.

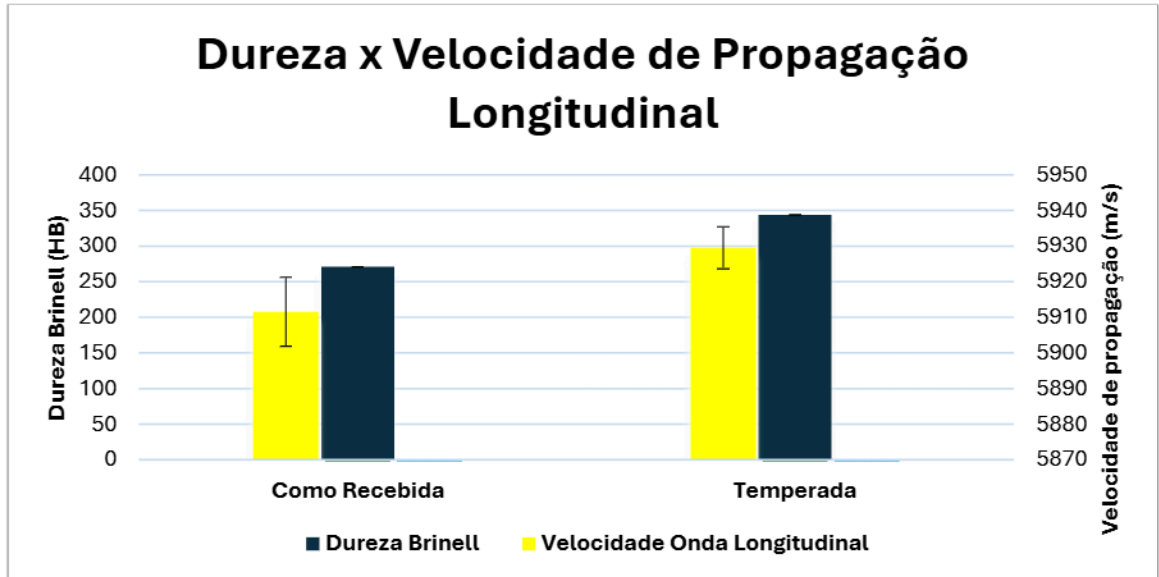


Figura 4.5 - Representação gráfica correlacionando as curvas de velocidade de propagação de ondas longitudinais com dureza das amostras.

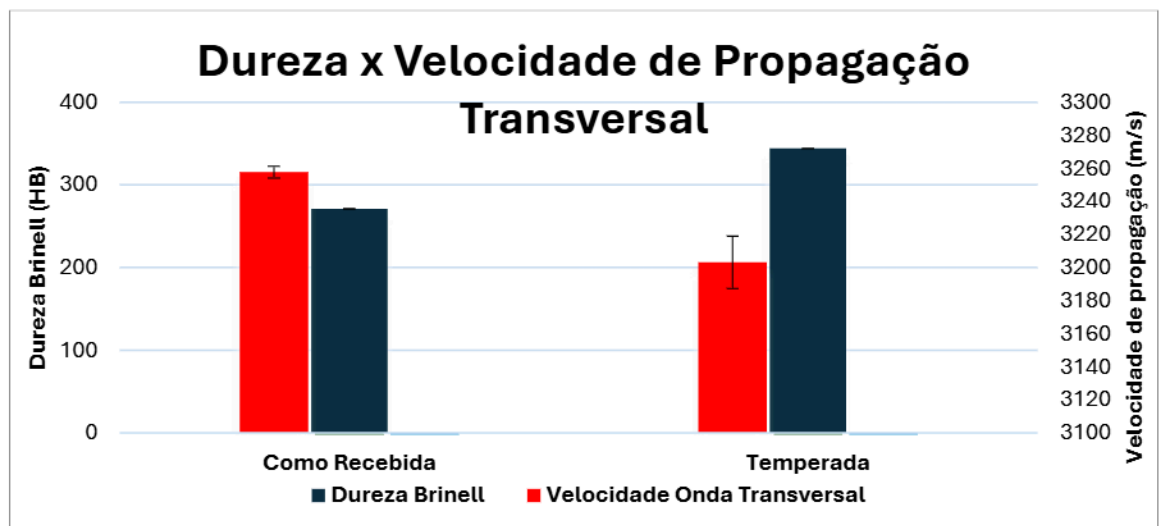


Figura 4.6 - Representação gráfica correlacionando as curvas de velocidade de propagação de ondas transversais com dureza das amostras

É possível inferir de forma visível a correlação crescente existente entre a dureza medida das amostras e a velocidade de propagação longitudinal pela técnica ultrassônica, à medida que a velocidade de onda transversal se comporta de maneira inversa ao aumento de dureza.

Além disso, busca-se a correlação entre os valores de dureza e atenuação, que são apresentados na Figura 4.7 a seguir, apresentando um comportamento semelhante ao de dureza com velocidade de onda longitudinal, com uma correlação crescente.

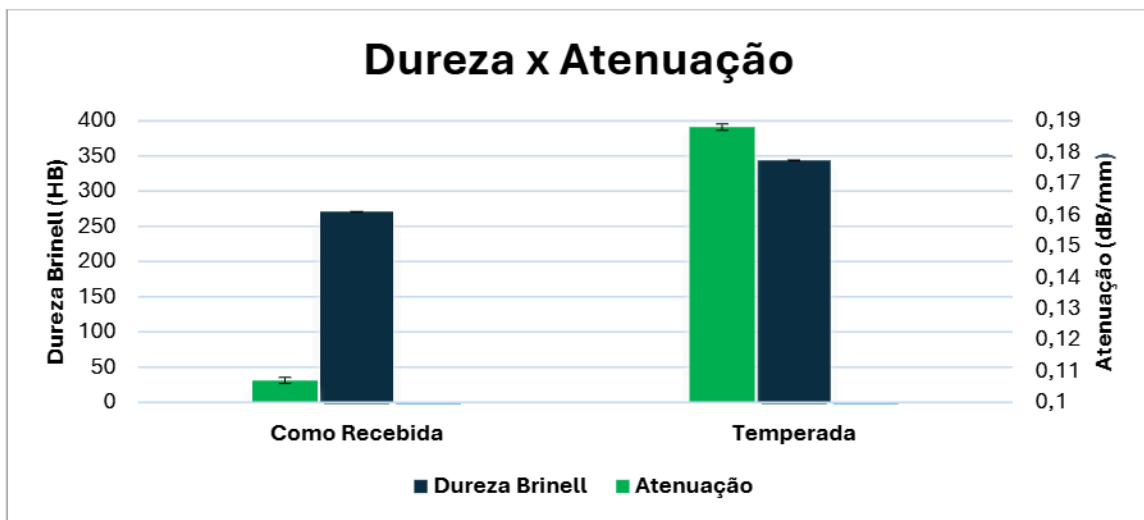


Figura 4.7 - Imagem correlacionando as curvas de atenuação sônica com dureza das amostras.

A correlação entre atenuação sônica e as diferentes velocidades de propagação também pode ser feita com o intuito de corroborar ainda mais a existência da correlação das propriedades provenientes do ensaio de ultrassom, demonstrando um comportamento linear crescente entre esses dois parâmetros para a velocidade das ondas longitudinais e um comportamento inverso para o segundo caso, ou seja, com o decréscimo da velocidade de propagação transversal, ocorre um aumento da atenuação (Figuras 4.8 e 4.9).

Segundo Tehrani et. al. (2019), o tratamento de têmpera, sem o alívio de tensões internas, acarreta endurecimento e fragilização do material, dificultando a propagação da frente sônica na microestrutura, aumentando, desta forma, o tempo de propagação da frente sônica, conseqüentemente, o aumento da dureza implica em um decréscimo das velocidades transversais.

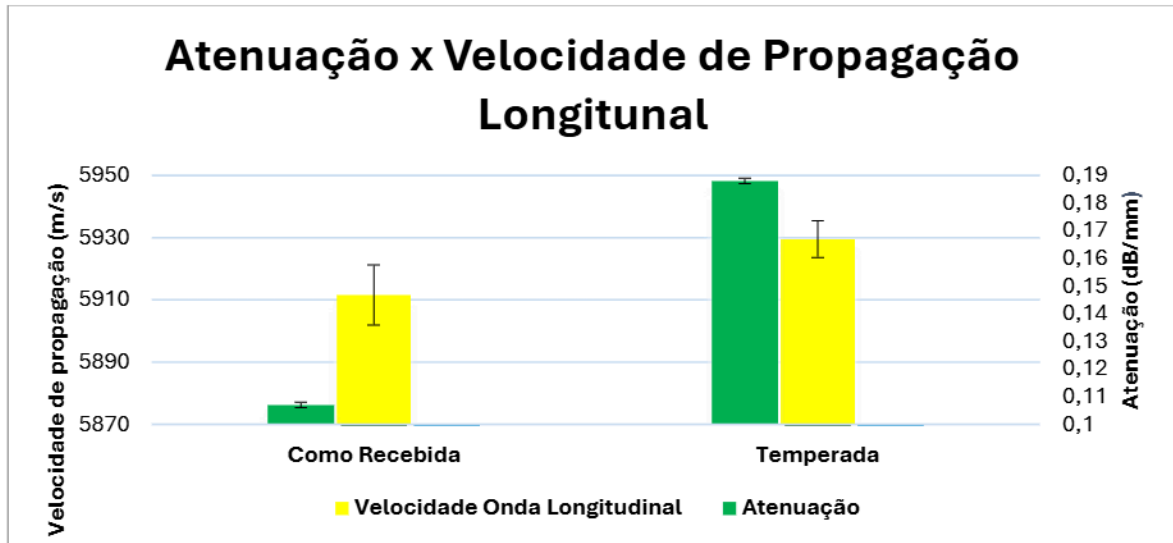


Figura 4.8 - Imagem correlacionando as curvas de velocidade de propagação de ondas longitudinais com atenuação sônica.

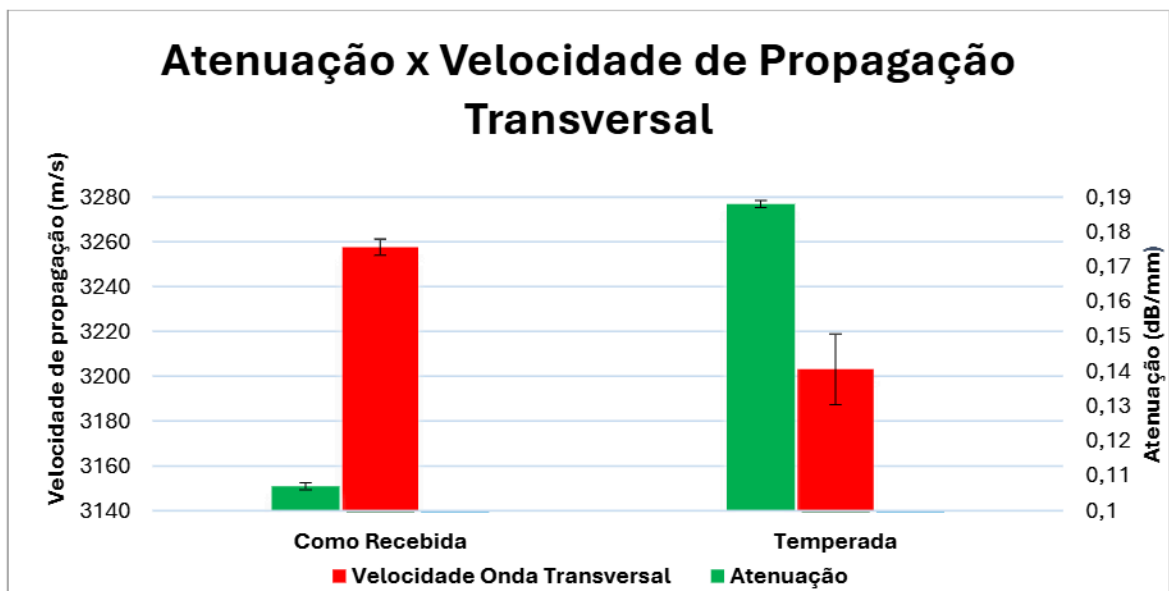


Figura 4.9 - Imagem correlacionando as curvas de velocidade de propagação de ondas transversais com atenuação sônica

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo o estudo de correlação entre o comportamento mecânico e aspectos microestruturais do aço ARBL USI-SAR-80T, nos estados como fornecido pelo fabricante (temperado e revenido) e submetido ao tratamento térmico de têmpera, com propriedades resultantes de medidas ultrassônicas, permite as seguintes conclusões:

1. As velocidades das ondas longitudinais e transversais e o coeficiente de Poisson estimados a partir das medidas ultrassônicas apresentam valores compatíveis com a literatura.
2. Verifica-se a variação na velocidade da onda transversal nos diferentes estados de tensão interna para uma microestrutura semelhante.
3. Evidenciou uma correlação linear entre velocidades, dureza e coeficiente de atenuação:
  - A velocidade da onda longitudinal aumenta com o acréscimo da dureza e do coeficiente de atenuação;
  - A velocidade da onda transversal diminui com o acréscimo da dureza e do coeficiente de atenuação;
  - A dureza aumenta com o acréscimo do coeficiente de atenuação.
4. A velocidade de propagação das ondas transversais e o coeficiente de atenuação são os melhores parâmetros para caracterização do material por medidas ultrassônicas.
5. Medidas ultrassônicas podem ser utilizadas no monitoramento do comportamento das propriedades mecânicas na vida residual de componente mecânico avaliando e garantindo a confiabilidade estrutural.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme observado durante todo o estudo, a utilização de propriedades ultrassônicas mostrou-se uma abordagem alternativa para o estudo do comportamento mecânico do USI SAR-80T.

Entretanto, como margem de aprimoramento, é de grande valia a implementação de uma abordagem que relacione as propriedades elásticas do material com as velocidades ultrassônicas, determinando assim, resultados mais exatos para o estudo.

Os ensaios de tração são fundamentais para caracterizar o comportamento mecânico dos materiais, especialmente em termos de suas propriedades elásticas e resistência. Durante o teste, é possível obter informações cruciais sobre o limite de resistência, o limite de escoamento, o módulo de elasticidade (ou módulo de Young), a deformação elástica e plástica, bem como a ductilidade do material.

Para o material USI SAR-80T, os ensaios de tração permitem a avaliação de suas propriedades elásticas, que são essenciais para entender seu desempenho em aplicações industriais. O módulo de elasticidade, por exemplo, é determinado na fase inicial do ensaio, onde o comportamento tensão-deformação do material é linear. Essa fase é regida pela Lei de Hooke, que estabelece uma relação proporcional entre a tensão aplicada e a deformação resultante, permitindo calcular o módulo de elasticidade como o coeficiente angular da curva tensão-deformação nesta região.

Além disso, outras propriedades elásticas, como o limite de resistência e o coeficiente de Poisson, podem ser obtidas a partir do ensaio de tração. O limite de resistência corresponde ao ponto em que o material começa a sofrer deformações plásticas, ou seja, deformações permanentes que não desaparecem com a remoção da carga. O coeficiente de Poisson, por sua vez, relaciona a deformação lateral com a deformação longitudinal na região elástica.

Diante do estudado, o ensaio de tração demonstrou ser uma excelente alternativa para uma nova abordagem no estudo das propriedades dos materiais. As propriedades elásticas obtidas a partir desse tipo de ensaio oferecem fatores extremamente relevantes para uma análise mais robusta e precisa na determinação das características de um

material através de ensaios ultrassônicos. Essa integração de métodos reforça a confiabilidade dos resultados e amplia as possibilidades de aplicação prática na avaliação de materiais em diferentes contextos industriais e científicos.

Também é proposta a realização de análises envolvendo a aplicação da microscopia eletrônica de varredura (MEV) para uma melhor caracterização micrográfica, possibilitando a ampliação das investigações que envolvem a correlação entre os aspectos microestruturais do material, propriedades mecânicas e as medidas ultrassônicas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom**. Ed Janeiro/2024.

ARAÚJO, C. A. **Comparação entre sequências de soldagem progressiva e passo reverso através de análise numérica e experimental**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbooks: Metallography and Microstructures**. v.9, 1985.

ASTM E18-24. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Mecânica dos Materiais**. 5. Ed., Porto Alegre: McGraw-Hill, 2015.

BHADESHIA, H. K. D. H.; **Steels Microstructure and Properties**. 3ª Ed., Oxford, Oxfordshire, England, 2006.

BORN, M.; WOLF, E. **Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light**. 7th ed. New York: Pergamon Press, 1989.

BRAZ, M. H. P.; **Propriedades de Fadiga de Soldas de Alta Resistência e Baixa Liga Com Diferentes Composições Microestruturais**; Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1999.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002

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.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7ª Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2005. 599 p.

DA FONSECA, L. N. **Caracterização macro e microestrutural e comportamento mecânico de juntas de aço USI-SAR-80T soldadas pelo processo GMAW com auxílio de processos vibracionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho” Campus de Guaratinguetá, 2016.

ENSMINGER, D.; BOND, L. J. **Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

FADARE, D. A.; FADARA, T. G.; AKANBI, O. Y. Effect of heat treatment on mechanical properties and microstructure of NDT 37-2 steel. **Journal of Minerals and Materials Characterization & Engineering**, v. 10, p. 299-308, 2011.

FREITAS, V. L. A.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; SILVA, E. M.; ALMEIDA, A. A.; TAVARES, J. M. R. S. Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements. **Ultrasonics**, v. 52, n. 1, p. 15–22, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312468687>. Acesso em: 12 jan. 2025.

GORNI, A. A.; MEI, P. R. Aços alternativos ao HY-80 sem a necessidade de aplicação de têmpera e revenido. **Revista Metalurgia e Materiais**, v. 56, n. 4, p. 287-293, 2003.

HECHT, E. **Optics**. 5. ed. Boston: Pearson Education, 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HULL, B.; JOHN, V. **Non-Destructive Testing**. London: Macmillan, 1988.

JUNIOR, A. S. **Avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas de aço HY-80**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2013.

KINSER, L. E. et al. **Fundamentals of Acoustics**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2000.

KRAUTKRAMER, J.; KRAUTKRAMER, H. **Ultrasonic Testing of Materials**. 4. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1990.

KUMAR, A. Ultrasonic velocity ratio: an effective tool for in-situ materials characterization. **Acta Acustica United With Acustica**, v. 104, p. 251-258, 2018.

MACIEL, P. H. C. **Efeitos de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento em um aço baixo carbono visando à fabricação de vergalhões grau CA50 de 10 mm**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

MORAIS, D.; LYRA, D.; POSSANI, D.; CONTE, F. Ondas Ultrassônicas: teoria e aplicações industriais em ensaios não-destrutivos. **Revista Brasileira de Física e Tecnologia Aplicada**, Ponta Grossa, v. 4, n. 1, p. 16-33, jan./jun. 2017.

NDT SYSTEMS. **Transducer Catalog Version 3.1**. Huntington Beach, CA: NDT Systems Inc., 2021. Disponível em: <[www.ndt.com](http://www.ndt.com)>. Acesso em: 10 jan. 2025.

NÚÑEZ, M. M. G. **Avaliação do comportamento em corrosão dos aços API 5LX70 e API 5LX80 em meio contendo CO<sub>2</sub>, por técnicas de análises superficiais e eletroquímicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2006.

SANTIN, J. L. **Ultra-som: técnica e aplicação**. 2. ed. Curitiba: Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.

SANTOS, J.; HENRIQUES, A. A. Strength and ductility of damaged Tempcore rebars. **1st International Conference on Structural Integrity - Procedia Engineering**, v. 114, p. 800-807, 2015.

SCHEFFER CIPRIANI, L. **Propriedades mecânicas e características microestruturais de um aço de alta resistência submetido a diferentes processos de têmpera**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SHULL, P. J. **Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.

SILVA BASTOS, J. **Verificação da influência da aplicação de montagens distintas do preaquecimento do aço de alta resistência e baixa liga SAR 80T no processo de soldagem por eletrodo revestido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

SILVA, M. C. **Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80**. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TEHRANI, N. N.; ABBASI, Z.; OZEVIN, D.; INDACOCHEA, J. E.; Metallurgical Characterization of a Low Carbon Steel Microstructure Using Linear and Nonlinear Ultrasonics; **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2019.

USIMINAS, **Catálogo USIMINAS de Chapas Grossas**, 2015.

WANG, C.Y.; SHI, J.; CAO, W.Q.; DONG, H. Characterization of microstructure obtained by quenching and partitioning process in low alloy martensitic steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, p. 3442–3449, fev., 2010.

XAVIER, C.; **Estudo de tratamento térmicos da liga Ti-15Zr-xMo**; Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2016.