



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO BAIXO TOCANTINS
FACULDADE DE ENGENHARIA INDUSTRIAL
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RAYANE BALIEIRO PINHEIRO

**PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ULTRASSOM DO AÇO
ESTRUTURAL ASTM A131 COM E SEM TRATAMENTOS TÉRMICOS**

ABAETETUBA-PA

2022

RAYANE BALIEIRO PINHEIRO

**PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ULTRASSOM DO AÇO
ESTRUTURAL ASTM A131 COM E SEM TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Industrial da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Baixo Tocantins, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

P654p Pinheiro, Rayane Balieiro.
Predição das propriedades mecânicas por ultrassom do aço
estrutural ASTM A131 com e sem tratamentos térmicos / Rayane
Balieiro Pinheiro. — 2022.
58 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, Curso de
Engenharia Industrial, Abaetetuba, 2022.

1. Aço ASTM A131. 2. Propriedades mecânicas. 3.
Ultrassom. 4. Correlação estatística. I. Título.

CDD 620

RAYANE BALIEIRO PINHEIRO

**PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ULTRASSOM DO AÇO
ESTRUTURAL ASTM A131 COM E SEM TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do grau de Engenheiro de
Produção pela Universidade Federal do Pará.

Julgado em 29 de junho de 2022

Conceito: **Excelente**

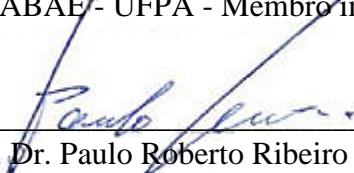
Banca Examinadora



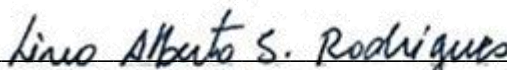
Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
UFPA - Orientador, Presidente



Profa. Dra. Ana Áurea Barreto Maia
CABAE - UFPA - Membro interno



Prof. Dr. Paulo Roberto Ribeiro Marques
CABAE - UFPA - Membro interno



Lino Alberto Soares Rodrigues
Eng. Químico – Membro Convidado

Dedico aos meus pais Ribamar e Maria Antonete parte do que sou e das escolhas que fiz devo a vocês, sempre!

Aos meus avôs Licomedes (*In memoriam*) e Raimunda pelo carinho, afeto, dedicação e cuidado que me deram durante toda a minha existência!

Ao meu orientador Ednelson Costa por ser uma constante fonte de motivação e incentivo ao longo de todo o projeto. Muito obrigada!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir concretizar mais este sonho, por jamais me deixar abandonar e por sempre sonhar coisas grandes para a minha vida. A Deus toda glória e honra para sempre.

A meus pais Ribamar e Antonete, que nunca mediram esforços pra me fazer feliz e me ensinarem a ser uma pessoa honesta, trabalhadora e vencedora, sempre me ensinaram a sonhar e confiar em Deus em todos os momentos da minha vida.

A minha avó Raimunda por me encorajar a continuar neste curso nos momentos difíceis, quando pensei em desistir me deu forças para prosseguir.

Ao meu orientador, Ednelson Costa, por toda paciência que teve comigo, mesmo com todas as minhas ocupações e dificuldades, se mostrou sempre interessado em me ajudar a concluir o curso, pelo apoio e interesse em me ajudar a fazer um excelente trabalho, meus sinceros agradecimentos, devo a você pelo grande apoio.

A todos os membros e colaboradores do Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM).

Aos meus colegas de turma de Engenharia de Produção 2016, em especial aos meus amigos Mr^a Sirleira, Rafaelly, Angresson e Josielson, porque durante todo período em que estudamos sempre me ajudaram em tudo quanto precisei, obrigado pelo apoio e conselhos para conclusão desse trabalho.

A todos os professores que fizeram parte da minha vida acadêmica, contribuindo para meu aprendizado e crescimento.

“Ainda que a minha mente e o meu corpo se enfraqueçam, Deus é a minha força, ele é tudo o que sempre preciso”.

(Salmos 73.26)

RESUMO

No panorama contemporâneo, muito se tem discutido sobre o papel que os Ensaio Não Destrutivos (END) exercem nas atuais indústrias. Pode-se destacar o ultrassom, sendo o método que permite avaliar e inspecionar um determinado material ou produto sem prejudicar seu uso posterior. Desta maneira, o presente trabalho busca prever o comportamento das propriedades mecânicas como o limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento com relação a velocidade da onda ultrassônica cisalhante, e ainda permite comparar como tais propriedades comportam-se no material submetido a tratamento térmico de Normalização, Têmpera, Têmpera seguido de Revenido e Recozimento Pleno. Uma vez que no processo de fabricação é recorrente o uso de ensaios mecânicos destrutivos, a necessidade de reduzir o desperdício do material é alta. Assim, como principais resultados, foi possível constatar que para o material sem tratamento térmico os limites de escoamento e resistência estimados apresentaram um desvio padrão de no máximo, $\pm 4,7$ e $\pm 5,2$ MPa, respectivamente. Sendo possível afirmar que o método de inspeção não destrutivo pode ser utilizado para garantir que as características mecânicas estejam de acordo com as especificadas pela norma ASTM A131/131M. Foi constatado também que a técnica não se aplica para prever a separação de materiais com diferentes microestruturas, sendo necessário analisar uma quantidade maior de amostras para tal fim.

Palavras-chave: Aço ASTM A131. Propriedades mecânicas. Ultrassom. Correlação estatística.

ABSTRACT

In the contemporary scenario, much has been discussed about the role that Non-Destructive Testing (END) plays in current industries. One can highlight the ultrasound, being the method that allows the evaluation and inspection of a given material or product without hindering its further use. Thus, the present work seeks to predict the behavior of mechanical properties such as yield strength, tensile strength, and elongation with respect to the velocity of the shear ultrasonic wave, and also allows comparison of how such properties behave in material subjected to heat treatment of Normalizing, Quenching, Quenching followed by Tempering, and Full Annealing. Since in the manufacturing process the use of destructive mechanical tests is recurrent, the need to reduce material waste is high. Thus, as main results, it was possible to verify that for the materials without heat treatment the yield and strength limits estimated presented a standard deviation of maximum, ± 4.7 and ± 5.2 MPa, respectively. It is possible to state that the non-destructive inspection method can be used to ensure that the mechanical characteristics are in accordance with those specified by ASTM A131/131M. It was also found that the technique is not applicable to predict the separation of materials with different microstructures, being necessary to analyze a larger amount of samples for this purpose.

Keywords: ASTM A131 steel. Mechanical properties. Ultrasound. Statistical correlation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do Ensaio de Tração	20
Figura 2 – Representação esquemática de uma onda longitudinal	24
Figura 3 – Representação esquemática de uma onda cisalhante.	25
Figura 4 – Representação esquemática de uma onda de Raleigh.	26
Figura 5 – Representação esquemática de uma onda de Love.	26
Figura 6 – Cabeçote ou Transdutor.	30
Figura 7 – Esquema de acoplamento normal.....	31
Figura 8 – Esquema em Técnica de imersão.	32
Figura 9 – Imagem ilustrativa da chapa como recebida com seus respectivos cortes e dimensões.	35
Figura 10 – Imagem do analisador químico	36
Figura 11 – Ilustração das faces analisadas para determinar a microestrutura do material como recebido	36
Figura 12 – Cortadora metalográfica ou <i>Cut-Off</i>	37
Figura 13 – (a) Embutidora metalográfica. (b) Amostras após o processo de embutimento. ...	37
Figura 14 – Politriz metalográfica	38
Figura 15 – Microscópio óptico ZEISS modelo Axio Scope	39
Figura 16 – Forno Câmara Grefortec 1200 °C.	40
Figura 17 – Esquema ilustrativo dos corpos de prova usados nos ensaios de tração e suas dimensões em mm.	41
Figura 18 – Sistema de aquisição ultrassônica.	42
Figura 19: Ilustração da amostra indicando os pontos de medição da velocidade da onda cisalhante antes da fabricação dos corpos de prova de tração.....	43
Figura 20 - Microestruturas do aço ASTM A131 em diferentes condições. (a) Como recebido; (b) Normalizado; (c) Têmpera. (d) Têmpera seguido do Revenido. (e) Recozimento Pleno. Aumento de 100x	45
Figura 21.a) - Relação entre o limite de escoamento e a velocidade da onda ultrassônica.(b) Relação entre o limite de resistência à tração e a velocidade da onda ultrassônica. (c) Relação entre o alongamento e a velocidade da onda ultrassônica	49
Figura 22 – Relação entre tratamento térmico, propriedade mecânica e velocidade ultrassônica.	51

Figura 23 - Comparativos entre velocidade acústica e propriedades mecânicas obtidos em amostras com e sem tratamentos térmicos. (a) Limite de escoamento. (b) Limite de resistência a tração.....52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A-131	17
Tabela 2 – Composição química do aço ASTM A-131.....	18
Tabela 3 – Análise química do aço ASTM A131.....	45
Tabela 4 – Tamanho médio de grão.	47
Tabela 5 – Propriedades mecânicas e velocidade de onda do material recebido.	47
Tabela 6 – Propriedades mecânicas e velocidade de onda do material pós-tratamentos térmicos.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos tipos de transdutores	29
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	METALURGIA FÍSICA DO AÇO ASTM A131	17
2.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS	18
2.2.1	Normalização	18
2.2.2	Têmpera.....	19
2.2.3	Têmpera seguida do revenimento	19
2.2.3.1	Revenimento	19
2.2.4	Recozimento pleno.....	19
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS	20
2.3.1	Ensaio de Tração	20
2.3.2	Limite de Escoamento (σ_e).....	21
2.3.3	Limite de resistência a tração (σ_r)	21
2.3.4	Alongamento (Δl)	22
2.4	ULTRASSOM	22
2.4.1	Princípios básicos do ultrassom	23
2.4.2	Tipos de ondas acústicas	24
2.5	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE ONDAS ACÚSTICAS	27
2.5.1	Velocidade, Comprimento e Frequência	27
2.5.2	Tipos de cristais e transdutores.....	28
2.5.3	O transdutor.....	29

2.5.4	Acoplante.....	30
2.6	TÉCNICAS DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM	31
2.6.1	Técnica de Impulso-Eco ou Pulso-Eco.....	31
2.6.2	Técnica de Transparência.....	31
2.6.3	Técnica de Imersão	32
2.6.4	Técnica de ressonância.....	32
2.7	DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ULTRASSOM 32	
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	AÇO ASTM A 131	35
3.2	ANÁLISE QUÍMICA	35
3.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA	36
3.3.1	Corte	37
3.3.2	Embutimento.....	37
3.3.3	Lixamento e polimento.....	38
3.3.4	Ataque químico.....	39
3.3.5	Micrografia.....	39
3.4	TRATAMENTOS TÉRMICOS	39
3.4.1	Normalização	40
3.4.2	Têmpera e Têmpera seguidas do Revenimento	40
3.4.3	Recozimento Pleno.....	41
3.5	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	41
3.6	REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ULTRASSOM.....	42
3.7	PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ULTRASSOM	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	ANÁLISE QUÍMICA	45
4.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	45

4.3	CORRELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DA ONDA ULTRASSÔNICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS ANTES DO TRATAMENTO TÉRMICO.....	47
4.4	CORRELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DA ONDA ULTRASSÔNICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS APÓS OS TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	50
5	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No panorama contemporâneo, muito se tem discutido sobre o papel que exercem os Ensaio Não Destrutivo (END) nas atuais indústrias. Países, como o Brasil, que já sofreu com crises econômicas e que assolam a indústria siderúrgica, entendem as feridas que a falta deste processo traz, não só para a academia, que perde, mas para a própria indústria, que se veem tolhidas dos recursos necessários. No entanto, é certo que testes mecânicos destrutivos como, por exemplo, os ensaios de tração e microdureza são massivamente utilizados e causam impactos no material. Por isso, a constante busca por novas tecnologias que atendam a indústria e diminuam esses impactos fazendo com que a mesma se torne mais produtiva e lucrativa, são amplamente necessárias (ABENDI, 2019).

O método END é usado em várias etapas de produção, na manutenção e inspeção de equipamentos e apresentam como objetivo principal garantir o controle de qualidade e a segurança. Um dos métodos de END muito utilizados na indústria é o de ultrassom, que é um método que permite avaliar e inspecionar um determinado material ou produto sem danificá-lo ou destruí-lo, isto é, sem prejudicar seu uso posterior.

O presente trabalho contempla também o estudo dos tratamentos térmicos, estes por sua vez buscam, através de um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento subsequente, a modificação da estrutura cristalina do material o que implica na melhoria de alguma propriedade e na deterioração de outra.

Nesse sentido, com base na mudança de velocidade da onda cisalhante, possivelmente gerada pela variação microestrutural causada pelos tratamentos térmicos, este trabalho objetiva prever o comportamento de propriedades mecânicas como limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT) e alongamento (Δl) com relação a essa variação de velocidade. Também se estuda a predição dessas mesmas propriedades para o material sem tratamento térmico (STT).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Estimar as propriedades mecânicas do aço ASTM A131 através da velocidade da onda ultrassônica cisalhante.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar caracterização química do material como recebido;
- b) Aplicar tratamentos térmicos em amostras do material para verificar sua influência na velocidade da onda ultrassônica e relacionar as propriedades mecânicas do aço ASTM;
- c) Realizar análises micrográficas do material antes e após os tratamentos térmicos;
- d) Medir a velocidade da onda ultrassônicas em amostras antes e após os tratamentos térmicos;
- e) Determinar o limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento e microdureza do material antes e após os tratamentos térmicos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo foi organizado em quatro capítulos, para facilitar a compreensão do mesmo, e assim estando de acordo com as normas exigidas neste tipo de trabalho.

No primeiro capítulo que corresponde à parte introdutória do trabalho, foram abordadas considerações iniciais, além da definição dos objetivos geral e específicos a serem alcançados.

No segundo capítulo consta a fundamentação teórica, onde são abordados conceitos de tratamentos térmicos, ensaios mecânicos, bem como a técnica de ultrassom utilizada.

No terceiro capítulo são apresentados o material e métodos aplicados na pesquisa, da mesma maneira que no capítulo seguinte através de um comparativo das normas para realização do método com os resultados realizados, assim, podendo observar o comportamento esperado do material à aplicação das técnicas.

E, no quinto e último capítulo expõe-se as considerações finais, as recomendações para futuros trabalhos, assim como, as referências bibliográficas necessárias para a realização deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 METALURGIA FÍSICA DO AÇO ASTM A131

Apesar do constante desenvolvimento de novos materiais, o aço ainda é um dos mais confiáveis, mais usado e mais importante material aplicado na indústria. Dependendo da composição química e histórico de processamento termomecânico durante o processo de fabricação, suas propriedades mecânicas podem variar enormemente, cobrindo uma ampla gama de resistência, tenacidade e ductilidade (SILVA, 2006). O aço também pode ser fabricado de forma relativamente barata em grandes quantidades para determinadas aplicações (SILVA & MEI, 2006).

Desta maneira, aço ASTM A131 é a designação dada pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM) para o aço baixo carbono também chamado de hipoeutetóide cujo teor de carbono varia entre 0,03% e 0,8% (BRUNATTO, 2016). Sua estrutura é usualmente perlítica e ferrítica, o que faz com que estes materiais tenham dureza e limite de resistência relativamente menores do que os demais aços com maiores níveis de carbono, mas com o benefício de serem mais dúcteis e tenazes, além de serem facilmente usináveis e soldáveis. Tipicamente possuem um limite de escoamento máximo de 275 MPa, resistência a tração entre 415 e 550 MPa com ductilidade até 25% (CALLISTER, 2002).

A ASTM classifica o aço ASTM A131 em dois grupos de acordo com seus graus, sendo eles de Força Ordinária ou Resistência comum - Graus A, B, D e ferritina, e de Força Superior ou Alta Resistência - Graus AH, DH, EH e FH (ASTM A131/A131M-14).

As propriedades mecânicas e químicas do aço ASTM A131 são apresentados nas Tabelas 1 e Tabela 2, respectivamente (ASTM A131/A131M-14).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A-131

Grau	Resistencia a tração [MPa]	Ponto de solda, min [MPa]	Alongamento mínimo em 200 mm [%]	Alongamento mínimo em 50 mm [%]
Resistencia comum: A, B, D, E	400 a 520	235	21	24
Alta resistência:				
AH32, DH32, EH32, FH32	440 a 590	315	19	22
AH36, DH36, EH36, FH36	490 a 620	355	19	22
AH40, DH40, EH40, FH40	510 a 650	390	19	22

Fonte: ASTM, 2014.

Tabela 2 – Composição química do aço ASTM A-131 – Grau A

Elemento químico	%
C	0,21
Mg	2,5 x C
Si	0,50
P	0,035
S	0,035
Ni	<=0,02
Cr	<=0,02
Mo	<=0,02
Cu	<=0,02

Fonte: ASTM, 2014.

2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

O tratamento térmico tem como objetivo alterar as propriedades dos aços através de operações de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo (de permanência em determinada temperatura), atmosfera do recinto. Dentre as principais transformações, podem-se citar: aumento de resistência mecânica, à corrosão, ao desgaste; melhoria de ductibilidade, da usinabilidade e das propriedades de corte; modificação de propriedades elétricas e magnéticas. No entanto, é necessário que o processo seja aplicado criteriosamente já que a melhora de uma propriedade pode influenciar na deterioração de outra (CHIAVERINI, 2005).

Dentro desse contexto, existem vários tipos de tratamentos térmicos aplicados nos materiais metálicos, entre os quais, os abordados neste trabalho são descritos a seguir.

2.2.1 Normalização

É o aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de resfriamento ao ar tranquilo, visa refinar a granulação de peças de aço fundido e de peças depois de laminadas ou forjadas, sendo o tratamento preliminar à têmpera e ao revenido. Produz estrutura uniforme, reduz a tendência ao empenamento, facilita a solução de carbonetos e elementos de liga, os constituintes resultantes da normalização são ferrita e perlita fina, ou cementita e perlita fina, dependendo do aço, bainita (CHIAVERINI, 2005).

2.2.2 Têmpera

Consiste no aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização – entre 815°C e 870°C - seguido de resfriamento rápido. Os meios de resfriamentos dependem da endurecibilidade dos aços, da forma e dimensões da peça submetidas a têmpera, porque o objetivo desta operação é a obtenção da martensita, sendo os meios mais comuns de resfriamento são líquidos ou gasosos - líquidos: água, água com sal ou aditivos cáusticos, óleo(aditivos), soluções aquosas de polímeros -gasosos: ar, gases inertes (N, He, Ar) (CHIAVERINI, 2005).

Esta operação consiste em obter: dureza do aço e sua resistência a tração, logo, resulta em um material que possui ótimas combinações de resistência e tenacidade (SILVA & MEI, 2006).

2.2.3 Têmpera seguida do revenimento

2.2.3.1 Revenimento

O revenimento é o tratamento térmico que normalmente acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidas por esta; além de aliviar ou remover tensões internas, corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque. A temperatura do revenido pode ser escolhida de acordo com a combinação de propriedade mecânicas que se deseja no aço temperado. Nesta operação a temperatura do tratamento é importante, assim como o tempo de permanência à temperatura considerada (CHIAVERINI, 2005).

2.2.4 Recozimento pleno

Consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica (durante tempo necessário), seguido de um resfriamento muito lento (com uma velocidade de resfriamento em relação ao forno ou deixando que o aço esfrie junto com ele). Os constituintes estruturais que resultam do recozimento são perlita e ferrita para aços hipoeutetóides, cementita e perlita para os aços hipereutetóides e perlita para os aços eutetóides. Deste modo, de acordo com o aumento da temperatura, a ductibilidade melhora e a resistência mecânica diminui (CHIAVERINI, 2005).

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS

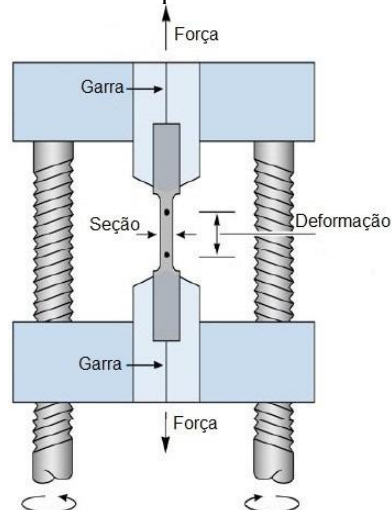
As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela realização de ensaios em laboratório cuidadosamente planejados, que produzem, de forma mais fiel possível, as condições de serviço. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. Propriedades mecânicas importantes para o projeto são rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade (CALLISTER, 2016).

Dentro desse contexto, é abordado a seguir o ensaio de tração e de microdureza utilizados no trabalho para determinar algumas propriedades mecânicas no material.

2.3.1 Ensaio de Tração

Para Zolin (2011), o ensaio de tração consiste na aplicação de uma força, que, ao agir sobre uma superfície de um corpo sólido provoca uma deformação na direção do esforço produzindo uma pressão. Quando essa força tende ao alongamento, acontece o que se chama de tensão de tração. Há uma relação entre tensão aplicada (carga sobre área da secção transversal da peça) e a deformação resultante. A Figura 1, apresenta um desenho esquemático desse ensaio.

Figura 1 – Desenho esquemático do Ensaio de Tração



Fonte: Edisciplinas.usp, 2021.

O ensaio de tração é um dos mais importantes ensaios mecânicos a que os materiais metálicos são submetidos para determinação de suas propriedades. Esse ensaio é conhecido como ensaio universal, pois o mesmo informa uma grande quantidade de propriedades

mecânicas, entre as quais pode-se citar as seguintes: Limite de escoamento, Limite resistência à tração, Limite de ruptura, módulo de elasticidade, alongamento, dentre outros.

A seguir são descritas algumas as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração e também as utilizadas neste trabalho.

2.3.2 Limite de Escoamento (σ_e)

A literatura define o limite de escoamento sendo a tensão máxima que pode ser aplicada sem que o material sofra deformação permanente ou irreversível, entretanto, qualquer esforço que seja aplicado (de pequena intensidade) resultará em uma deformação elástica reversível. Ocorre apenas em materiais dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono. A tensão atingida durante o escoamento e é dada pela expressão (SOUZA, 1982).

$$\sigma_e = \frac{Q_e}{S_0} \quad (1)$$

Onde Q_e é a carga de escoamento. No SI, o limite de escoamento é dado em N/mm² ou MPa.

2.3.3 Limite de resistência a tração (σ_r)

Ao terminar o escoamento, o metal entra na fase plástica e o ensaio prossegue até ser atingida uma tensão máxima suportada pelo metal, que caracteriza o final da zona plástica. Assim, a aplicação de esforços que ultrapassem o limite de resistência causaria a quebra do material (SOUZA, 1982). Souza (1982) ainda afirma que o limite de resistência serve para especificar o material, do mesmo modo que a análise química identifica o material.

O limite de resistência, então, é determinado pela seguinte equação:

$$\sigma_r = \frac{Q_e}{S_0} \quad (2)$$

Onde Q_e é a carga máxima atingida durante o ensaio. Sendo assim, o limite de resistência no SI é dado em N/mm² ou MPa.

Observações sobre os resultados do ensaio de tração

Segundo Garcia, Spin e Santos (2012), os resultados apresentados pelo ensaio de tração poderão variar em função de uma série de condições, conforme se segue:

- temperatura de execução do ensaio;
- teor de soluto da liga;
- tratamentos térmicos e mecânicos;
- tamanho de grão do material.

2.3.4 Alongamento (Δl)

Como dito por Mascia (2017), neste ensaio determina-se a variação do comprimento compreendido entre A e B. Se l_0 é o comprimento inicial e l é aquele observado sob tensão de tração, o alongamento da barra vale:

$$\Delta l = l - l_0 \quad (3)$$

O alongamento por unidade de comprimento vale:

$$\varepsilon = \int_0^1 \frac{dl}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4)$$

Esse alongamento por unidade de comprimento é chamado de deformação linear ou específica, sendo uma quantidade adimensional. Se considerar a variação do comprimento da peça, a expressão anterior ficaria:

$$\varepsilon = \int_0^1 \frac{dl}{l_0} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (5)$$

2.4 ULTRASSOM

Estima-se que na antiguidade os homens utilizavam o som para identificar inúmeros materiais como a cerâmica, o vidro e os metais. No entanto, tais métodos ofereciam informações grosseiras dos materiais analisados. O primeiro passo para o desenvolvimento dos aparelhos de ultrassom utilizados na atualidade se deu em 1880, pois os irmãos Curie descobriram o chamado

Efeito Piezoelétrico, o qual se baseia na aplicação de pressão em cristais, que por sua vez, possuem capacidade de gerar corrente elétrica em resposta à pressão aplicada (VAN VLACK, 1970).

O teste de ultrassom é utilizado como um ensaio não destrutivo (END), pois não causa danos físicos ao material. Logo, assim como qualquer END, tem o objetivo de garantir a qualidade e diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais para aplicações industriais (SANTIN, 2003). O teste ultrassônico de materiais é feito com o uso de ondas mecânicas ou acústicas propagadas no meio em inspeção. Como exemplos das aplicações do ensaio por ultrassom, tem-se sua utilização na metalurgia na detecção de descontinuidades como trincas, defeitos de soldas, tensões residuais e também como ferramenta de controle de qualidade nas mais diversas áreas da indústria, como naval, aeronáutica e automotiva (FONSECA, 2005).

O ensaio por ultrassom permite ainda a aquisição de dados sobre as propriedades mecânicas, físicas e químicas de um material. Isto porque na propagação da onda, a mesma carrega consigo informações sobre o material analisado através da variação da velocidade sônica e atenuação. A aplicação da técnica ultrassônica propicia algumas vantagens como o baixo custo operacional, equipamento portátil que permite seu deslocamento com facilidade, todavia, a principal desvantagem apontada é a dificuldade de treinamento do operador (TITTMANN, 1978; FONSECA, 2005).

2.4.1 Princípios básicos do ultrassom

O ensaio de ultrassom se baseia na propagação, na reflexão e na difração de um feixe sônico em um meio. O ultrassom é uma onda mecânica e se propaga num meio material através do movimento das partículas (átomos ou moléculas) deste meio. Para que o som se propague é necessário haver uma interação de modo que o movimento oscilatório de um átomo ou molécula seja transmitido para a sua vizinhança.

Quando um átomo ou molécula é movido de sua posição de equilíbrio por uma força aplicada, as forças interatômicas agem de modo a restabelecer o equilíbrio. devido às forças interatômicas envolvidas em um arranjo cristalino o movimento de um átomo vizinhos também se deslocam do equilíbrio produzindo um movimento oscilatório. este movimento oscilatório ocorre sônica numa alta frequência que, dentro do espectro sônico, pode variar entre 10^4 e 10^9 Hz. Para aplicações práticas essa faixa varia de 0,5 a 25MHz, bem acima da faixa de audição humana, que vai de 20Hz a 20kHz.

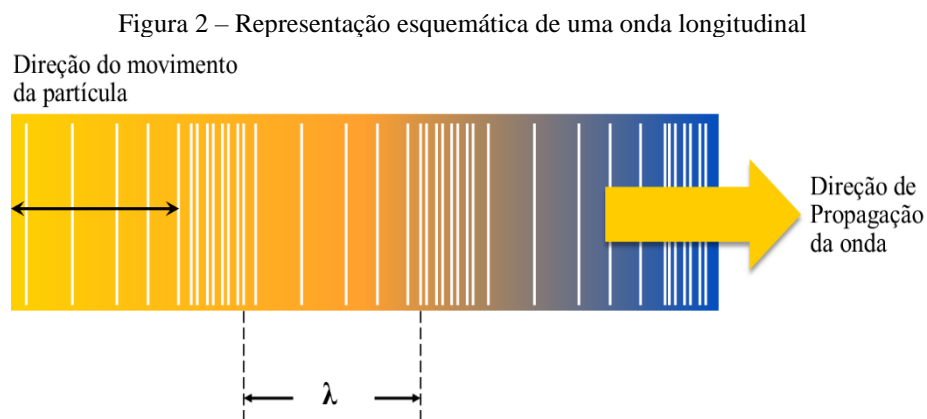
A onda acústica ao percorrer um meio sofre uma perda de energia mecânica gradual, à que chamamos de atenuação sônica. Esta, ao encontrar uma parede é refletida chega a outro meio. assim como na faixa de audição humana a reflexão da onda ultrassônica.

À velocidade de propagação de uma onda é constante e dependente apenas das propriedades e da temperatura do material. Podemos, portanto, através da medida de tempo decorrido entre decepção da onda calcular a distância entre a superfície onde a onda é produzida e a superfície onde ela é refletida, bem como a posição e tamanho de um evento no interior da peça

2.4.2 Tipos de ondas acústicas

a) Ondas longitudinais

De todas as ondas mecânicas da natureza, as mais importantes em nosso cotidiano são as ondas longitudinais, e que estas, necessitam de um meio material para se propagar. Neste caso, as oscilações acontecem na direção de propagação da onda (MEHTA; MONTEIRO, 2008).



Fonte: Teste Ultrassônico de materiais a nível 2 (*Ultrasonic testing of materials at Level 2*), 1988.

Na imagem acima, é possível verificar o aparecimento de “zonas de compressão” e “zonas diluídas” e que as distancias entre duas zonas de compressão determinam o comprimento da onda (λ) (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Todavia, este processo de propagação através do corpo de prova a uma certa velocidade VL (velocidade longitudinal) varia de acordo com o material. Sendo assim, estas grandezas relacionam-se, desta forma:

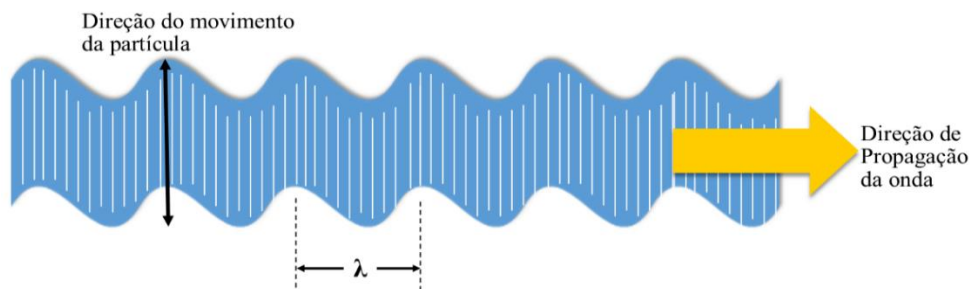
$$v = \lambda f \quad (6)$$

A frequência (f) é a taxa em que uma vibração se repete no tempo, ao qual nomeia-se período.

b) Ondas cisalhantes

Andreucci (2011) afirma que as ondas cisalhantes ocorrem quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular à direção de propagação. Por meio da Figura 3, observa-se que os planos de partículas, mantêm-se à distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente.

Figura 3 – Representação esquemática de uma onda cisalhante.



Fonte: Teste Ultrassônico de materiais a nível 2 (*Ultrasonic testing of materials at Level 2*), 1988.

Também chamadas de ondas transversais, estas se propagam em sólidos ou em líquidos muito viscosos e possuem velocidade bem inferior à velocidade de propagação da onda longitudinal para um dado material. Sendo assim, a velocidade da onda cisalhante para o aço é de 3240 m/s (ANDREUCCI, 2011).

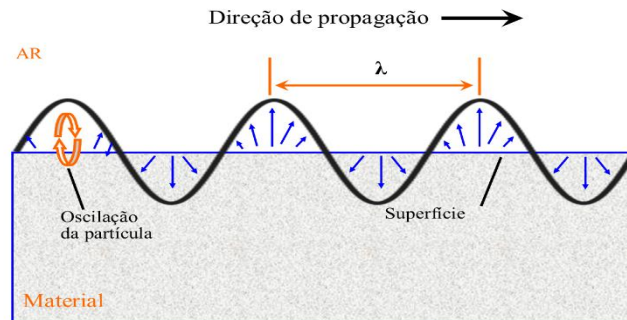
c) Ondas superficiais

Devido às características de propagação na superfície dos materiais, as ondas de superfície pertencem ao tipo secundário (o modo de vibração é uma combinação dos modos de vibração longitudinal e transversal), que são divididos em três categorias: Ondas de Raleigh; Ondas de Love; e Ondas de Lamb (FRAGA, 2007; ASSUMPCÃO E DIAS NETO, 2000).

As ondas de Raleigh propagam-se através de superfícies planas ou curvadas em sólidos relativamente espessos. Para este tipo de onda propagar-se deve haver uma interface entre forças fortemente elásticas de um sólido e forças elásticas praticamente inexistentes de um meio

gasoso ou líquido (BERUTTI, 2004, FRAGA, 2007). A Figura 4 ilustra de forma simplificada esta relação.

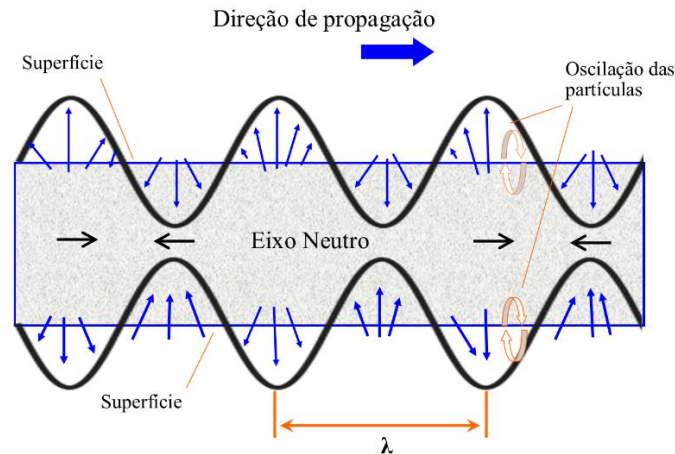
Figura 4 – Representação esquemática de uma onda de Raleigh.



Fonte: Teste Ultrassônico de materiais a nível 2 (*Ultrasonic testing of materials at Level 2*), 1988.

Segundo Farias *et al.* (2011), as ondas de Love também conhecidas como ondas de placa referem-se às perturbações elásticas que se propagam num material sólido (placas, chapas etc.) com as interfaces ou contornos livres. A espessura do material deve ser da ordem de grandeza dos comprimentos de onda presentes. Neste tipo de onda o comportamento da partícula ocorre tanto na direção de propagação quanto perpendicularmente ao comprimento do material.

Figura 5 – Representação esquemática de uma onda de Love.



Fonte: Teste Ultrassônico de materiais a nível 2 (*Ultrasonic testing of materials at Level 2*), 1988.

As ondas de Lamb são constituídas de superposições de ondas longitudinais e transversais em uma chapa fina e as características da propagação dependem intensamente das condições de contorno, tais como ângulo de incidência, forma de excitação, frequência central do transdutor, largura de banda e geometria do material (FARIAS *et al.*, 2011).

2.5 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE ONDAS ACÚSTICAS

2.5.1 Velocidade, Comprimento e Frequência

Considerando uma onda acústica se propagando num determinado material com velocidade do som v (m/s), frequência f (ciclos/s=Hz=1/s) e comprimento de onda λ (m), pode-se relacionar estes três parâmetros de acordo com a Equação 3.1. A relação dada por essa equação permite calcular o comprimento de onda, pois a velocidade de propagação das ondas acústicas depende do tipo de material e do modo de vibração das partículas, porém independe da frequência. Enquanto esta última depende somente da fonte emissora (ANDREUCCI, 2011; COSTA, 2017).

$$v = \lambda \cdot f \quad (7)$$

Como se verifica, a velocidade é um parâmetro fundamental da onda acústica e como na determinação de tensões por ultrassom a variação da velocidade dessa onda é analisada, então, mostra-se na Equação 8 a relação entre velocidade da onda e a tensão (COSTA, 2017).

$$v = v_0 + k\sigma \quad (8)$$

Nesta equação, v é a velocidade da onda (em m/s) num meio tensionado, enquanto v_0 é a velocidade da onda num meio sem tensão, σ é a tensão em MPa e k é um parâmetro do material conhecido como constante acustoelástica (MPa)⁻¹ (LU, 1996).

No trabalho de Bittencourt (2000) são mostrados os embasamentos teóricos para determinar a velocidade de propagação das ondas longitudinais, transversais e de *Rayleigh*, principais ondas utilizadas na análise de tensões. De forma resumida, são mostradas neste trabalho somente as equações matemáticas utilizadas para calcular a velocidade desses três tipos de ondas. Nesse contexto, a velocidade da onda ultrassônica longitudinal (c_L) em um sólido é dada pela Equação 9. Sendo C_L a velocidade da onda longitudinal (m/s), E é o módulo de *Young* (kg/mm²), ν é o coeficiente de *Poisson* (adimensional) e ρ a densidade do material (kg/m³).

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (9)$$

As velocidades para ondas cisalhantes (C_c) e superficiais de *Rayleigh* (C_s) são dadas pelas Equações 10 e 11, respectivamente. Em que G é o módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento (kg/mm^2).

$$C_c = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (10)$$

$$C_s = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (11)$$

Segundo Costa (2017), a função dos valores dos coeficientes de Poisson dos materiais, pode-se admitir que a relação entre as velocidades da onda cisalhante (C_c) e longitudinal (C_L) é dada pela Equação 12 e da onda superficial de Rayleigh (C_s) com a onda cisalhante é dada pela Equação 13.

$$C_c \cong 0,50C_L \quad (12)$$

$$C_s \cong 0,92C_c \quad (13)$$

Como se pode verificar, baseado nas equações acima, as propriedades dos materiais que influenciam a velocidade de propagação das ondas são sua massa específica, seu módulo de elasticidade e seu módulo de cisalhamento.

2.5.2 Tipos de cristais e transdutores

Andreucci (2014) relata que o transdutor será responsável por emitir as ondas que serão difundidas pelo material. Logo, estes objetos são construídos a partir de materiais piezoelétricos, cuja função é gerar pulsos e recebê-los. A capacidade piezoelétrica é perceptível em alguns cristais, que por sua vez, podem transformar energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar energia mecânica em elétrica. Alguns cristais naturais apresentam tais características como quartzo e a turmalina. Outros são fabricados artificialmente como o titanato de bário e o sulfato de lítio, e assim por diante.

Em outras palavras, o funcionamento do cristal ocorre de tal maneira que ao se aplicar corrente elétrica alternada de alta frequência, um cristal piezoelétrico vibra na mesma frequência,

gerando o ultrassom. Na recepção, ocorre o inverso: o ultrassom fará o cristal vibrar, gerando um sinal elétrico de alta frequência. Em geral, para os ensaios não-destrutivos utilizam-se frequências na faixa de 0,5 a 25 MHz (BELUTTI, 2004).

2.5.3 O transdutor

Embora o conceito básico seja simples, os transdutores são dispositivos de precisão que exigem muito cuidado no formato, na seleção do material e na fabricação para ajudar a garantir um desempenho ideal e consistente. Koops (2013) afirma que os transdutores comumente usados em END ultrassônicos se enquadram em subcategorias com base no ângulo de emissão/recepção da onda e quanto à função (emissor ou receptor ou emissor/receptor). No quadro 1 são mostrados a classificação dos transdutores.

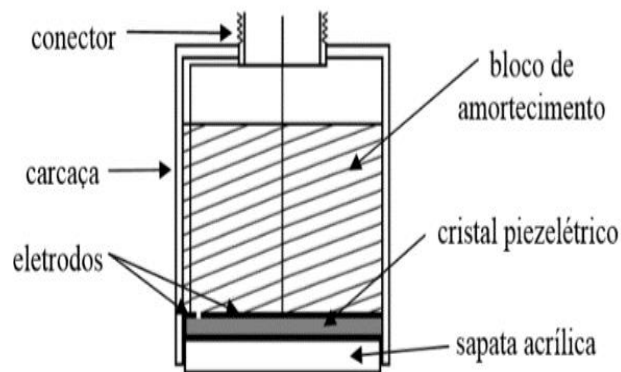
Quadro 1 – Classificação dos tipos de transdutores

Quanto ao ângulo de emissão/recepção	Normais	Emitem e/ ou recebem o ultrassom perpendicularmente à superfície.
	Angulares	Emitem e/ ou recebem o ultrassom obliquamente à superfície.
Quanto à função	Monocristal	Possuem apenas um cristal piezoelétrico. Há três modalidades: - só emissor de ondas - só receptor (deve trabalhar junto com o emissor. - emissor e receptor
	Duplo cristal	O mesmo transdutor possui um cristal para recepção e outro para emissão do ultrassom.

Fonte: Fischetti & Scott, 2007.

De maneira a exemplificar claramente a constituição do transdutor, a Figura 6 mostra a representação esquemática desse equipamento.

Figura 6 – Cabeçote ou Transdutor.



Fonte: Fonseca, 2005.

Geralmente, os transdutores normais apresentam formato circular, seu diâmetro varia entre 5 e 22 mm. Sua faixa de frequência varia em 0,1; 0,25; 5; 1; 2,25 e 5 MHz (FONSECA, 2005).

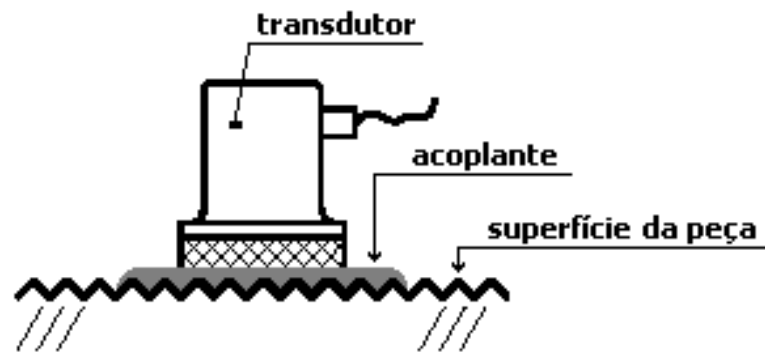
2.5.4 Acoplante

Uma vez que as ondas necessitam de um meio para propagar, se faz necessário o uso de um acoplante entre o transdutor e a peça a ser inspecionada para que haja maior transferência de energia para o material (FONSECA, 2005). Trombini (2015) afirma que para uma inspeção adequada é essencial observar as relações entre os acoplantes e o material a ser inspecionado quanto à sua impedância acústica. A impedância acústica (Z) é definida como sendo o produto da densidade do meio pela velocidade de propagação neste meio (V) e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio. A Equação 14 é utilizada para o cálculo da impedância.

$$Z = \rho \cdot V \quad (14)$$

Fonseca (2005) estabelece que para ensaios em aço ao carbono é aconselhável utilizar vaselina líquida ou em pasta, metil-celulose ou ainda o próprio óleo de proteção contra oxidação utilizado na indústria. Portanto, o tipo de transdutor utilizado irá definir o acoplante específico de forma a possibilitar uma melhor transmissão de ondas, bem como, uma baixa atenuação. Na Figura 7, mostra-se o desenho esquemático do transdutor, acoplante e superfície de medição.

Figura 7 – Esquema de acoplamento normal



Fonte: Fonseca, 2009.

2.6 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM

A inspeção de materiais por ultrassom para detecção de defeitos e até mesmo para analisar as tensões residuais e aplicadas pode ser efetuada basicamente, através de quatro técnicas: Pulso-Eco, Transparência, Imersão e Técnica de ressonância, as quais são descritas a seguir.

2.6.1 Técnica de Impulso-Eco ou Pulso-Eco

No caso de se utilizar apenas um cristal emissor/receptor, a medida do sinal de retorno deve ser feita quando o transdutor não está emitindo. Neste caso, as ondas ultrassônicas devem ser pulsantes. O cristal recebe o sinal de retorno no intervalo de pulsação, caso contrário, não será detectado (BERUTTI, 2004).

É amplamente utilizado para realizar medições de velocidade ultrassônica e atenuação. Essas duas medidas são as bases para avaliar com precisão a caracterização microestrutural e para avaliar as propriedades mecânicas (NDT HANDBOOK, 1991).

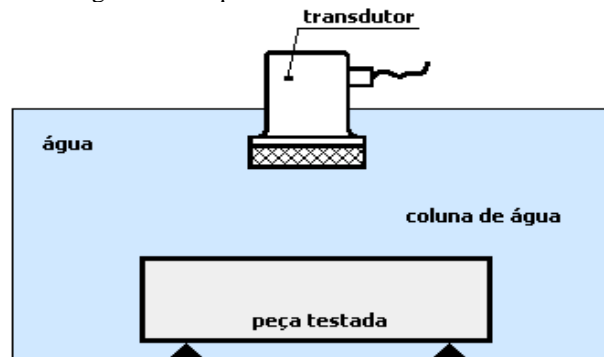
2.6.2 Técnica de Transparência

Neste método, dois transdutores são colocados opostos um ao outro nas duas superfícies de um material de teste. Um transdutor atua como o transmissor, enquanto o outro é o receptor. Se a onda transmissora encontra uma descontinuidade em seu caminho, uma porção da energia ultrassônica será atenuada por ele, reduzindo assim a amplitude do sinal recebido (BHARDWAJ, 1989).

2.6.3 Técnica de Imersão

Este método é semelhante ao método anterior, exceto que a peça a ser analisada é mergulhada em líquido, geralmente água. O rastreamento em tempo real desta configuração é mostrado na Figura 8. Este método é conhecido como método de imersão e é amplamente utilizado quando o movimento lateral e vertical livre do transdutor e a automação no teste são necessários.

Figura 8 – Esquema em Técnica de imersão.



Fonte: Fonseca, 2009.

2.6.4 Técnica de ressonância

O método de ressonância é baseado no método pulso eco, e assim como nele é feita a detecção de ondas refletidas (BRAGA, 2001). Fonseca (2005) retrata que a principal diferença é que no método da ressonância se busca sobrepor as ondas emitidas e refletidas, ou seja, se busca aumentar a vibração das partículas do meio para se obter um sinal amplificado.

Uma onda quando encontra uma descontinuidade sofre reflexão e retorna com fase invertida. Quando o feixe emitido e o feixe refletido se sobrepõem perfeitamente ocorre a ressonância. A ressonância ocorre, portanto, quando a espessura do material é igual a um múltiplo da metade do comprimento de onda utilizado (FONSECA, 2005).

2.7 DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ULTRASSOM

Freitas (2009) afirma em seu estudo que é possível caracterizar as heterogeneidades microestruturais a partir do ultrassom, isto é, caracterizar micro estruturalmente o material através da análise da interação de elementos microestruturais com o feixe ultrassônico. A

literatura possui uma vasta quantidade de trabalhos onde os autores aplicam medidas de ultrassom para calcular constantes elásticas, analisar microestruturas, textura e propriedades mecânicas.

Para calcular os módulos elásticos são utilizadas medidas de velocidade de ondas longitudinais e transversais (ou de cisalhamento) e da densidade do material. A microestrutura e morfologia podem ser caracterizadas através de medidas de velocidade e atenuação. As propriedades mecânicas dependem das propriedades elásticas, da microestrutura e morfologia do material. As avaliações são, portanto, realizadas de forma indireta, baseadas em correlações empíricas da velocidade e atenuação com fatores microestruturais e morfológicos (NDT HANDBOOK, 1991).

a) Velocidade do som

Freitas (2009) relata que a velocidade sônica depende da densidade, das constantes elásticas do material e do tipo de onda aplicada. Qualquer alteração microestrutural que afete tais variáveis irá refletir nos valores da velocidade.

$$v = \frac{2d}{t} \quad (15)$$

Para obter essa velocidade emprega-se a Equação 15, em que v é a velocidade de propagação da onda, d é espaço percorrido pela onda e t , o tempo que a onda leva para tocar o lado contrário do material analisado e retornar ao lado onde estar posicionado o transdutor (NDT HANDBOOK, 1991).

É válido citar que a *American Society for Testing and Materials* – ASTM, possui a norma ASTM E 494 - 20 que é direcionada para a determinação das velocidades das ondas longitudinais e de cisalhamento usando a forma de onda sonora apropriada.

b) Atenuação sônica

A atenuação sônica é outro parâmetro da onda. De acordo com Fonseca (2009), a atenuação é a diminuição da energia mecânica da onda causada pela absorção no meio e pelo espalhamento da onda. Ainda segundo o autor, a atenuação é detectada pela diminuição na altura dos picos no ecograma, e é causada pela presença de defeitos e refletores como contornos

de grão do material e pode, portanto, ser relacionada ao limite de resistência do material uma vez que este sofre efeito do tamanho de grão e da presença de defeitos.

Um exemplo de estudo sobre o uso de medidas de ultrassom (velocidade sônica e atenuação para ondas longitudinal e cisalhantes) é estudado por Badidi, Lebaili e Benchaala (2003). Onde os autores concluíram que em diferentes tamanhos de grão de um aço o experimento mostra a possibilidade de avaliar de forma qualitativa a granulometria do material a partir da velocidade, onde está velocidade diminui com o aumento do tamanho do grão.

Palanichamy *et al.* (1995) determinaram o tamanho do grão de aços inoxidáveis austeníticos com o uso da velocidade sônica (ondas longitudinal e transversal). Os autores analisaram amostras cujos tamanho de grãos eram diferentes. Segundo seus resultados, quanto maior o tamanho do grão menor a velocidade. De acordo com os resultados obtidos, para maiores valores de tamanho de grão menor será a velocidade.

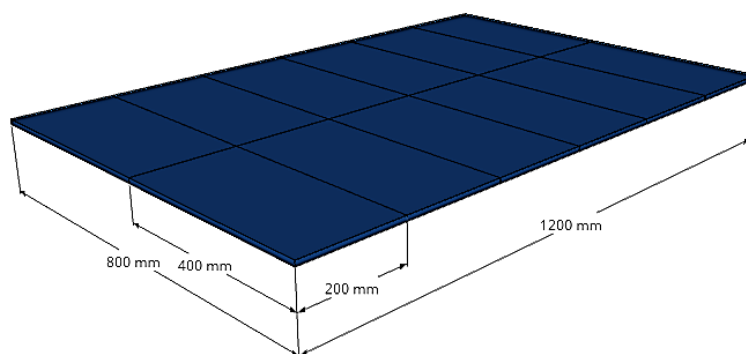
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 AÇO ASTM A 131

Utilizou-se neste trabalho chapas laminadas de tamanho retangular do aço estrutural ASTM 131 de dimensões 1200x 800 x 9,5 mm, com uma variação dimensional de 0,6 mm, cedidas pelo estaleiro Rio Maguari. O material é específico para a construção naval ou *off-shore*.

A chapa de aço como recebida é ilustrada esquematicamente na Figura 9. Desta chapa foram usinados corpos de prova (CP's) de dimensões 400 x 200 x 9,5 mm para todas as etapas do projeto, os quais são ilustrados também na Figura 9.

Figura 9 – Imagem ilustrativa da chapa como recebida com seus respectivos cortes e dimensões.



Fonte: Autora,2022.

Para a realização do trabalho a metodologia adotada é descrita a seguir.

3.2 ANÁLISE QUÍMICA

A análise da composição química do material é importante porque permite identificar quais os elementos químicos que constituem o mesmo e dessa forma se torna uma das maneiras de classificar o material, no caso, o aço.

Assim, para a análise foi retirado uma amostra do material como recebido e analisado por um espectrômetro de emissão óptica da *Oxford Instruments* de modelo *Foundry-Master Xpert* (Vide Figura 10). A preparação da superfície da amostra para este ensaio consistiu no lixamento da superfície com lixa de granulometria 60 *mesh* para a remoção de resíduo, dessa forma, manteve-se uma certa rugosidade para facilitar a sua vaporização durante o ensaio. Os

resultados da análise química serão comparados com os dados da norma ASTM A131/A131M - 14 (*Standard Specification for Structural Steel for Ships*) (ASTM, 2019).

Figura 10 – Imagem do analisador químico

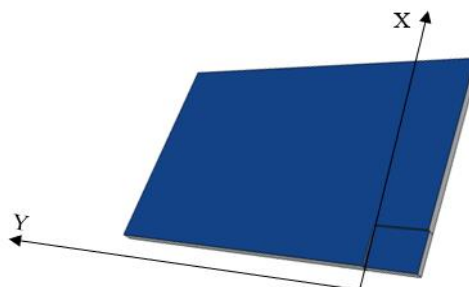


Fonte: Promarchive, 2021.

3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Para realizar a análise microestrutural do material como recebido foram retiradas duas amostras do mesmo. A primeira com face de análise na direção de menor comprimento (eixo- x , direção transversal à direção de laminação) e a segunda com face de análise superior da chapa e na direção de maior comprimento da mesma (eixo- y , direção paralela à laminação). A Figura 11 mostra o esquema de amostra retirada para análise metalográfica. É importante ressaltar que os mesmos procedimentos para a análise metalográfica foram realizadas para o material em todas as condições estudadas.

Figura 11 – Ilustração das faces analisadas para determinar a microestrutura do material como recebido



Fonte: Autora, 2022.

A seguir, apresentam-se os passos utilizados para a análise metalográfica do material com e sem tratamentos térmicos.

3.3.1 Corte

Após a escolha da localização da seção a ser estudada foi feito o corte com disco de corte e para a análise metalográfica, foi utilizado uma cortadora metalográfica (*cut-off*), conforme a Figura 12, a qual não altera de maneira agressiva as propriedades do material a ser estudado.

Figura 12 – Cortadora metalográfica ou *Cut-Off*.



Fonte: Autora, 2022

3.3.2 Embutimento

O embutimento consiste na fixação da amostra para o exame micrográfico, a amostra é embutida com material termoplástico por meio de prensa, utilizando-se pressão e aquecimento para a polimerização. Este método consiste em colocar o corpo de prova com a face a ser analisada em contato com o êmbolo inferior da máquina de embutimento (vide Figura 13). Após apertar o êmbolo, coloca-se a resina (baquelite) na câmara de embutimento pressionando-a por um determinado tempo, deformando-se de acordo com as variáveis tempo, temperatura e pressão exercida pelo pistão hidráulico da máquina chamada “Embutidora Metalográfica”.

Figura 13 – (a) Embutidora metalográfica. (b) Amostras após o processo de embutimento.



Fonte: Autora, 2022.

3.3.3 Lixamento e polimento

A operação de lixamento tem por objetivo eliminar riscos e marcas de corte do *cutt-off* mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento. Existem dois processos de lixamento: manual e automático. A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior (COLPAERT,1897). O lixamento Manual foi o processo utilizado no trabalho.

Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica, é essencial que cada etapa da preparação seja executada cautelosamente, sendo um dos processos mais demorados da preparação de amostras metalográficas. Este processo é realizado com lixas de carbetto e silício. Neste trabalho, o lixamento iniciou-se na direção normal aos riscos de usinagem, com uma lixa de 80 *mesh*, em seguida utilizou-se com granulometrias menores na ordem de 100, 120, 180, 220, 320,400, 600, 800, 1200 e 2000 *mesh*.

Após o lixamento foi realizado o polimento da superfície a ser analisada. Tal procedimento prioriza um acabamento superficial mais adequado, isento de marcas devido ao lixamento, de forma a se ter uma superfície espelhada. Para o polimento foi usada Alumina em suspensão com granulometria de 0.3, 0.5 e 1 μm como solução abrasiva, a mesma é colocada sobre o pano de polimento na politriz, ao mesmo tempo que abre a água (bem pouco) para a lubrificação e eliminação de impurezas. Após esse processo as amostras foram higienizadas com álcool etílico, devido a sua alta volatilidade, e secas com um secador na posição vertical. Na Figura 14, mostra-se a imagem da politriz onde ocorreu o lixamento e polimento das amostras.

Figura 14 – Politriz metalográfica



3.3.4 Ataque químico

Para a revelação e análise da microestrutura do material sem foi utilizado o reagente químico Nital 4% (4 ml de HNO₃ em 96 ml de álcool etílico). Já para o material sob condições de tratamentos térmicos (normalização, têmpera e têmpera seguida do revenido) foi utilizada a mistura de Nital 4% + Picral 4%. Utilizou-se o método de passadas durante o contato da peça com o reagente.

3.3.5 Micrografia

Para a realização da análise micrográfica, lançou-se mão do exame microscópico com seus fatores de aumento, que além de ser um equipamento altamente preciso e especializado capaz de caracterizar os microconstituintes bem como o tamanho médio de grãos. Após o ataque químico foi dado início as fotomicrografias, estas imagens foram obtidas em ampliações de 100x (antes e depois do tratamento térmico) por meio da utilização do microscópio óptico ZEISS modelo Axio Scope A1 430035 – 9080 – 000 (Vide Figura 15).

Figura 15 – Microscópio óptico ZEISS modelo Axio Scope



Fonte: Zeiss.com, 2022.

3.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para os tratamentos térmicos foram usadas amostras de 200 x 20 x 9,5 mm, retirados da chapa de medidas 400 x 200 x 9,5. Cabe ressaltar que para cada tipo de tratamento (Normalização (N), Têmpera (T), Têmpera seguido do Revenimento (T+R) e Recozimento

Pleno) foram utilizadas três amostras do aço. Para a realização dos tratamentos térmicos foi utilizado um Forno Câmara Grefortec 1200 °C, Figura 16. A seguir é descrito cada procedimento dos tratamentos utilizados no trabalho e que os parâmetros para cada tipo de tratamento foram baseados em Cardoso (1999).

Figura 16 – Forno Câmara Grefortec 1200 °C.



Fonte: Autora, 2022.

3.4.1 Normalização

A amostra designada ao tratamento térmico de Normalização (N) foi submetida a um tempo de permanência no forno de 60 minutos sob temperatura de 900°C, para que ocorresse o encharcamento do aço. Seguida de resfriamento lento e uniforme ao ar (meio ambiente). Após os tratamentos térmicos a amostra foi levada para análise metalográfica, onde esta foi cortada, embutida, polida, atacada para posterior análise microestrutural e determinação de tamanho de grão através da microscopia óptica. Cabe salientar que o objetivo desse tratamento é refinar a granulação grosseira do aço gerada pelos processos de laminação ou forjamento. Os microconstituintes que se obtém desse tratamento são ferrita e perlita fina ou cementita ou perlita fina.

3.4.2 Têmpera e Têmpera seguidas do Revenimento

Uma amostra foi submetida a Têmpera durante um período de 60 minutos, a uma temperatura de 900°C. Após o tempo necessário para o encharcamento do aço, a amostra foi retirada e resfriada em água. Outra amostra passou pelo mesmo procedimento de têmpera, porém imediatamente, retornou-se a amostra ao forno para o Revenimento sob a temperatura

de 250 °C por um período também de 60 minutos. Por fim, retirou-se o material para o resfriamento natural até o equilíbrio com a temperatura ambiente. Ressalta-se que o objetivo principal da Têmpera é obter martensita na estrutura do aço, microconstituente duro e frágil. Já o objetivo do Revenimento é baixar a dureza gerada pela Têmpera e aumentar a tenacidade do material.

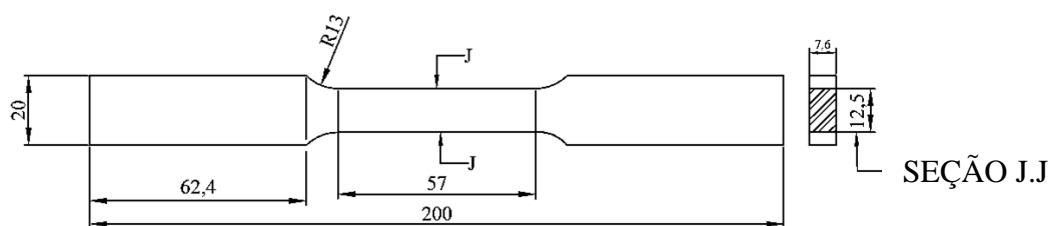
3.4.3 Recozimento Pleno

A amostra designada ao tratamento de Recozimento Pleno foi submetida ao aquecimento do aço acima da zona crítica cerca de 950 °C (durante o tempo de 60 minutos), seguido de um resfriamento muito lento no forno. O Recozimento Pleno tem com o objetivo reduzir ao máximo a dureza do aço, aumentando sua ductibilidade e usinabilidade, além de controlar o tamanho de grão do material.

3.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para a determinação das propriedades mecânicas foi realizado o ensaio de tração, neste caso, empregou-se os corpos de prova, (Figura 17), com dimensões recomendados pela norma ASTM E8/8M-15a - *Standard Test Methods for Determining* (ASTM, 2014).

Figura 17 – Esquema ilustrativo dos corpos de prova usados nos ensaios de tração e suas dimensões em mm.



Fonte: Autora, 2022.

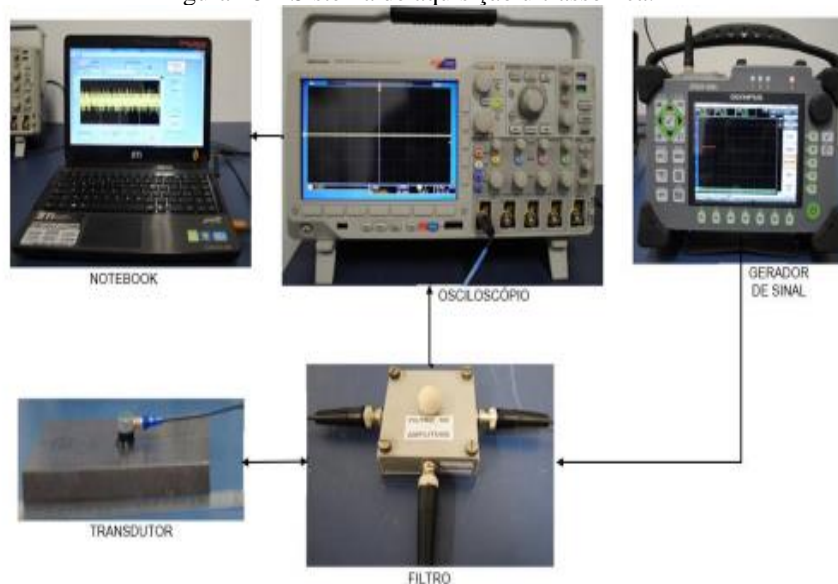
Para a realização do ensaio de tração e determinar as propriedades mecânicas, limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT), alongamento (Δl) de amostras do aço ASTM A131, com e sem tratamentos térmicos. Utilizou-se a Máquina de Ensaio Universal Servopulser Shimadzu de modelo EHF-EM100KN-20L com sistema de aquisição de dados através do Software presente em um computador acoplado à máquina, velocidade de ensaio de 1 mm/min, a máquina possui capacidade de 100 kN.

Para os ensaios de tração do material como recebido foram usinados 15 corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 17. Além disso, foram usinados mais 12 corpos de prova, os quais foram divididos em partes iguais, ou seja, quatro grupos de três CP's, para serem aplicados os tratamentos térmicos de Normalização, Têmpera, Têmpera seguido do Revenido e Recozimento Pleno. Ressalta-se que todos os corpos de prova de tração antes de chegarem ao seu formato, conforme a Figura 17, estiveram na forma de pequenas tiras de dimensões 200 x 20 x 9,5 mm, nas quais ao longo de seu comprimento, distante 40 mm, de ponto a ponto, foi medida a velocidade da onda cisalhante, cuja velocidade média e propriedades mecânicas como limite de escoamento, resistência à tração e alongamento serão relacionadas neste trabalho.

3.6 REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ULTRASSOM

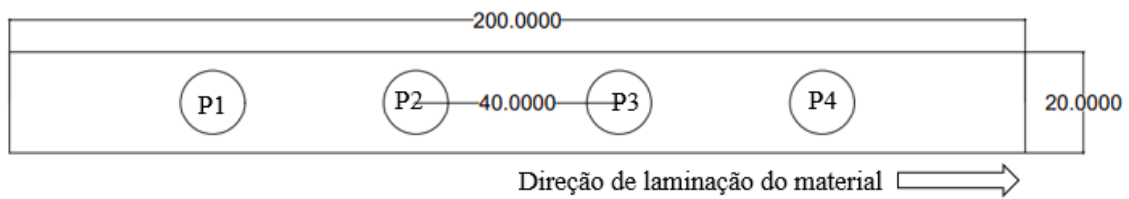
A inspeção por ultrassom (medição da velocidade da onda cisalhante) foi realizada pelo método pulso-eco por contato que mede o tempo ou a velocidade de percurso ida e volta da onda, foi utilizado como acoplante entre o transdutor e a amostra, um acoplante comercial de elevada viscosidade. Também foi utilizado um gerador de sinal, EPOCH 1000i, da empresa Olympus®. Um osciloscópio para visualização do sinal da Tektronix®, modelo MSO 3054. Utilizou-se um transdutor de frequência central na faixa de 5 MHz, com diâmetro efetivo de 12,7 mm. Por fim, foi utilizado um programa no notebook desenvolvido em linguagem de programação *Python* que utiliza interpolação e correlação cruzada para melhorar a precisão do sinal adquirido. A Figura 18 mostra o sistema de aquisição de sinais.

Figura 18 – Sistema de aquisição ultrassônica.



A velocidade ultrassônica de cada CP que foi determinada pela Equação 15 é correspondente a média dos quatro pontos medidos ao longo do CP(Figura 19). Além disso, em cada um dos pontos medidos foram aquisitados 3 sinais. Essa metodologia foi aplicada para todos os corpos de prova. Ressalta-se ainda que a velocidade da onda foi medida com a direção de polarização da onda paralela a direção de laminação do material.

Figura 19: Ilustração da amostra indicando os pontos de medição da velocidade da onda cisalhante antes da fabricação dos corpos de prova de tração.



Fonte: Silva, 2022.

3.7 PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS POR ULTRASSOM

A partir dos dados de velocidade da onda e das propriedades mecânicas, eles foram analisados em busca de uma relação entre si. Para a análise dos gráficos gerados pelos dados foram usados duas ferramentas estatísticas, correlação e regressão linear. A Correlação busca determinar (mensurar) o grau de relacionamento entre duas variáveis, X e Y, por exemplo, independentemente da unidade de medida de cada variável e é determinada pelo coeficiente de correlação, r , dada pela Equação 16. Em que nessa equação, n é o número de pontos medidos, x e y são as variáveis analisadas. O coeficiente r varia de -1 a 1. $r = -1$, indica correlação linear negativa perfeita; os pontos (x,y) estão sobre uma reta com coeficiente angular negativo. $r = 1$, indica correlação linear positiva perfeita; os pontos (x,y) estão sobre uma reta com coeficiente angular positivo. $r = 0$, indica que os pontos não estão correlacionados, nem apresentam tendência crescente ou decrescente (FONSECA, 2005).

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \cdot \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2] \cdot [n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (16)$$

Já a regressão linear estuda a relação entre uma variável chamada de dependente e outras variáveis chamadas de independentes que podem ser relacionadas através de uma equação matemática, que fornece o coeficiente de determinação, R^2 , usado na interpretação dos

resultados. Neste trabalho, a variável independente é a velocidade da onda e as variáveis dependentes são as propriedades mecânicas, LE , LRT e AL (FONSECA, 2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise química do aço como recebido. Trata-se um aço baixo carbono, onde o percentual de carbono está abaixo de 0,8%, o que o classifica como um aço hipoeutédóide. Além disso, esse aço conforme pertence à classe Grau A, com base na norma ASTM A131/A131M - 14.

Tabela 3 – Análise química do aço ASTM A131.

<i>Material</i>	<i>Elementos em peso (%)</i>								
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Metal de base Aço ASTM A-131	0,22	1,23	0,24	0,022	<0,001	0,015	0,014	<0,001	0,012
Aço ASTM Grau A	0,21	2,5XC	0,50	0,035	0,035	<=0,02	<=0,02	<=0,02	<=0,02

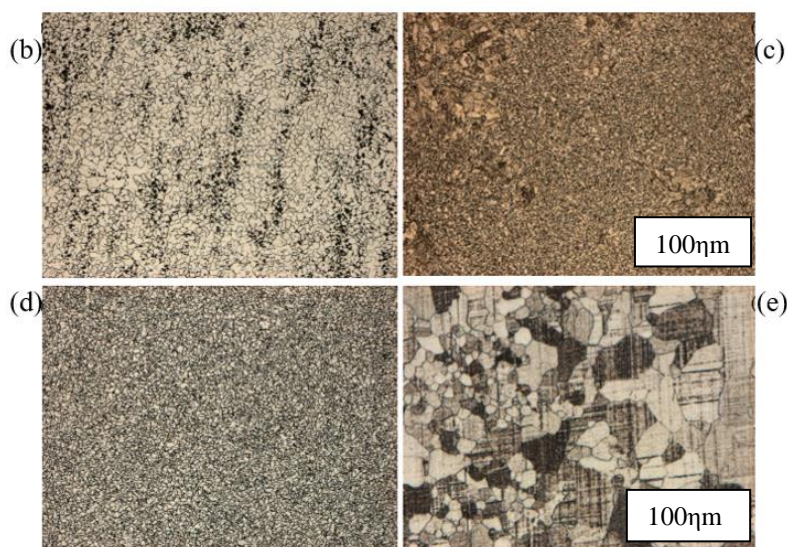
Fonte: Costa, 2017.

4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A microestrutura foi caracterizada em diferentes condições do material, como recebido (laminado) e após os tratamentos térmicos de normalização, têmpera, têmpera seguido do revenido e recozimento pleno. A Figura 20(a-e) mostra as microestruturas do aço para todas as condições. Na Figura 20a, material recebido, verifica-se colônias de perlitas (grãos escuros) nos contornos de ferrita (grãos claros), característico de aço baixo carbono (CHIAVERINI, 2008).

Figura 20 - Microestruturas do aço ASTM A131 em diferentes condições. (a) Como recebido; (b) Normalizado; (c) Têmpera. (d) Têmpera seguido do Revenido. (e) Recozimento Pleno. Aumento de 100x





Fonte: Silva, 2022.

A Figura 20(b-e) apresenta as micrografias do aço após a aplicação dos tratamentos térmicos. Independe da condição do material, é comum a presença de perlita e ferrita em todas as condições. Verifica-se que a normalização (Fig. 20b) provocou um leve aumento do tamanho de grão em relação ao material recebido, fato não esperado, pois de acordo com a literatura, a normalização refina os grãos. Provavelmente o tempo de encharque e a temperatura utilizada para a normalização, de acordo com o trabalho de (CHIAVERINI, 2008), possa ter permitido o crescimento da austenita e influenciando o tamanho dos grãos durante o resfriamento. Para a têmpera (Figura 20c), por se tratar de um aço baixo carbono, não houve a formação de martensita, pois a faixa de temperatura onde ocorre a separação da ferrita (zona crítica) é muito ampla e mesmo com o resfriamento rápido ainda assim há formação de ferrita, como afirma (CHIAVERINI, 2008).

Então, obteve-se uma estrutura, majoritariamente composta por ferrita e perlita. Além disso, constatou-se que os grãos resultantes da têmpera são mais refinados quando comparados com os grãos da amostra como recebida. Para o tratamento de têmpera seguido do revenido (Figura 20d) obteve-se grãos ainda mais refinados quando comparados com obtidos após a têmpera e com o material recebido. Por outro lado, o recozimento pleno (Figura 20e) gerou um aumento no tamanho de grão comparado as outras condições do material. Esta constatação é mostrada na Tabela 4. É importante ressaltar que para a determinação do tamanho de grão foi utilizado o Método dos Interceptos conforme a norma ASTM E112-96.

O aumento do tamanho de grão em espécies que apresentam fases ferrita-perlita gera a redução da tensão de escoamento do material e isto foi encontrado neste trabalho, conforme pode ser constatado nas Tabelas 4 e 6, e encontrado também por (AHN, 2000). Por outro lado,

nessas mesmas tabelas se observa que quando ocorre a diminuição do tamanho de grão há o aumento dos limites de escoamento e resistência a tração.

Tabela 4 – Tamanho médio de grão, segundo a norma ASTM E112

Amostra	Tamanho de grão	Diâmetro Médio
	ASTM (G)	(μm)
Sem Tratamento	10,2	11,2
Normalização	9,7	13,3
Têmpera	11,2	7,9
Têmpera + Revenido	11,6	6,7
Recozimento Pleno	9,3	15,2

Fonte: Silva, 2022.

4.3 CORRELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DA ONDA ULTRASSÔNICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS ANTES DO TRATAMENTO TÉRMICO

As propriedades mecânicas determinadas nos ensaios de tração de 15 corpos de provas sem tratamento térmico, assim com suas respectivas velocidades acústicas são mostrados na Tabela 5. Esses dados representam informações de amostras de 15 diferentes lotes de fabricação do aço. Os valores de referências para o material laminado de acordo com a norma ASTM A131/A131M-15 são: Tensão de Escoamento, mínimo de 235 MPa; Tensão de Resistência à Tração de 400 a 520 MPa e alongamento (ϵ), mínimo de 24%. Os resultados das tensões de escoamento e de resistência à tração, assim como, a maioria dos resultados do alongamento, com exceção dos resultados das amostras 1, 5 e 6 (em destaque na Tabela 5) corroboram com os valores de propriedades mecânicas do aço das classes A, B, D, E e CS (ASTM A131/A131M-15).

Tabela 5 – Propriedades mecânicas e velocidade de onda do material recebido.

Corpo de prova	Propriedades mecânicas			Velocidade da onda cisalhante (m/s)
	LE (MPa)	LRT (MPa)	Alongamento (%)	
CP1	275,3	415,4	21,0	3289,8
CP2	272,1	416,9	23,4	3287,7
CP3	273,8	418,0	24,2	3287,7
CP4	276,7	419,4	22,6	3286,4
CP5	278,8	418,7	21,1	3287,2
CP6	275,4	419,5	21,9	3287,3
CP7	283,3	432,6	25,8	3280,6
CP8	279,5	426,9	24,3	3281,9
CP9	291,6	439,4	24,5	3281,4

CP10	288,2	437,3	25,2	3279,5
CP11	291,5	441,2	26,2	3278,3
CP12	296,2	445,9	27,3	3280,3
CP13	266,9	403,2	30,5	3300,9
CP14	269,5	406,6	31,4	3299,3
CP15	274,3	413,9	26,9	3296,0

Fonte: Autora, 2022.

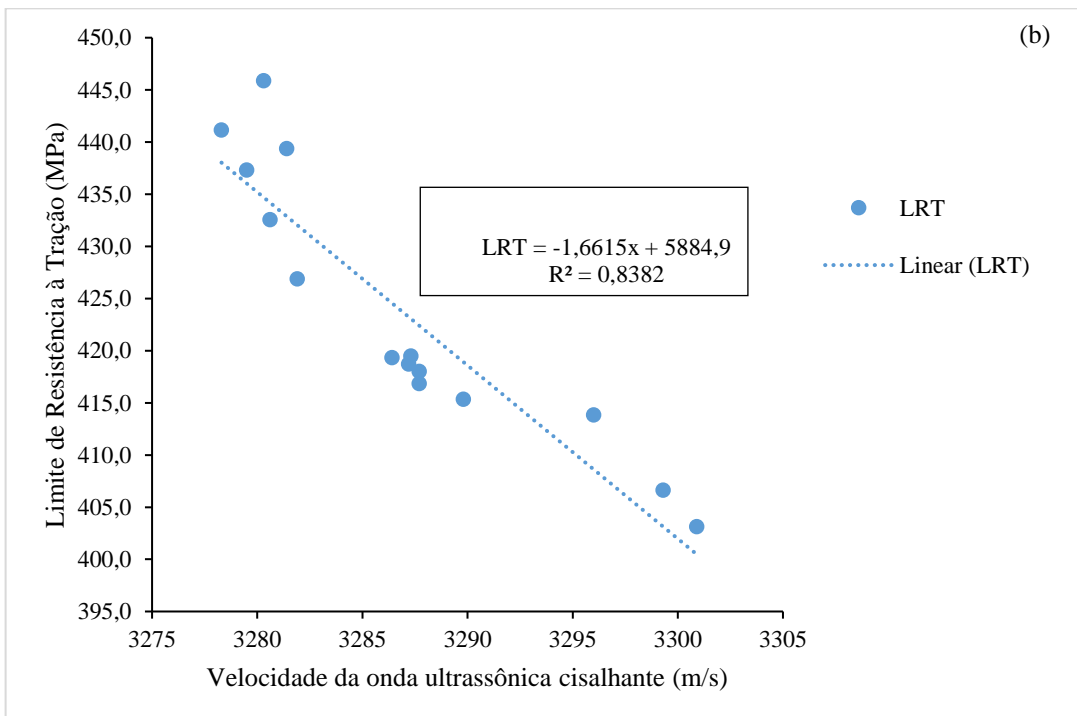
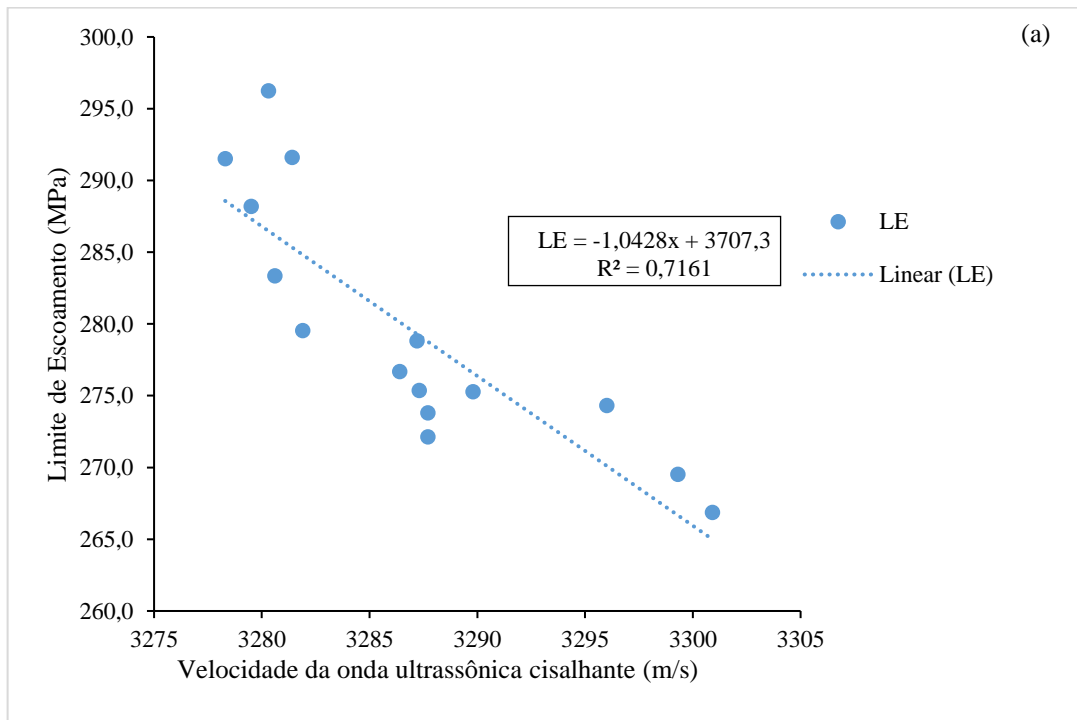
A velocidade da onda de cisalhamento medida nas amostras apenas laminadas (com a polarização da onda paralela à direção de rolamento do material) em função de LE, LTR e % AL é mostrado na Figura 21(a-c), respectivamente, obtidas da Tabela 5. Nessas figuras, para suas análises, foram utilizados o coeficiente de correlação, r , e o coeficiente de determinação, R^2 . Assim, pela Figura 21(a), constata-se uma correlação linear negativa ($r = -0,85$) entre a velocidade acústica e o limite de escoamento, ou seja, ocorre uma diminuição dessa propriedade com o aumento da velocidade. Uma tendência similar é observada entre velocidade e limite de resistência a tração, Figura 21(b), e em maior intensidade ($r = -0,92$).

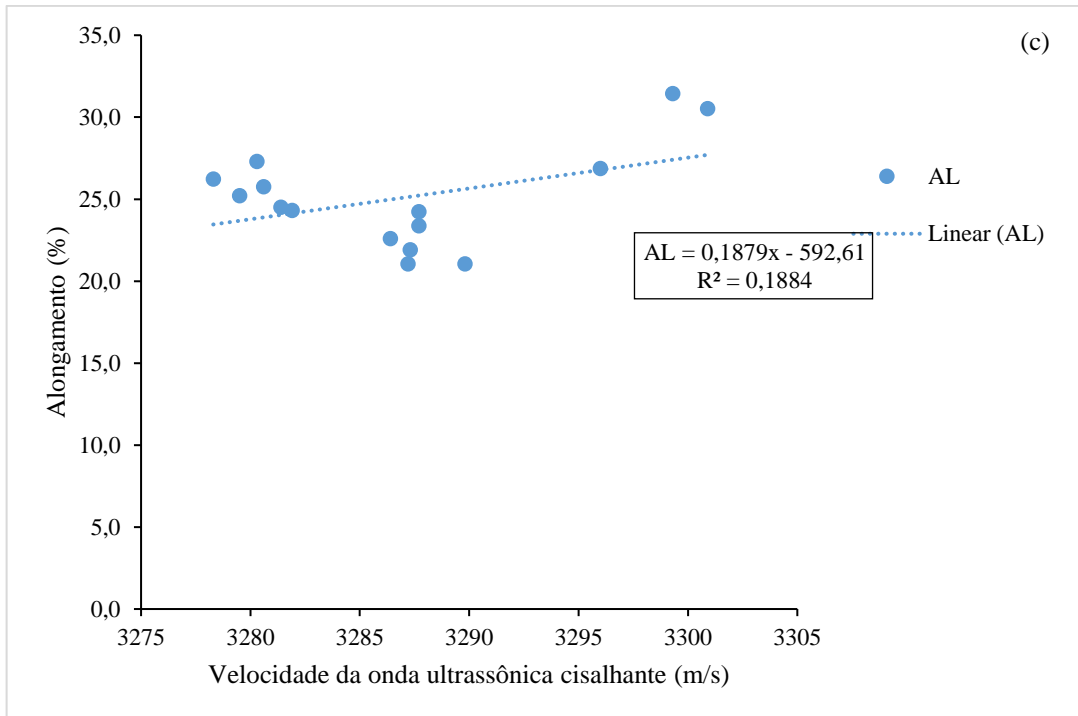
Por outro lado, a correlação entre velocidade e alongamento, Figura 21(c), é positiva, porém muito baixa ($r = 0,43$). Além disso, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,188$) reforça essa correlação não aceitável, pois aproximadamente somente 18,8% da variabilidade no alongamento do material são explicados pela velocidade da onda e que 81,2% são explicados por outros fatores.

Os coeficientes de determinação obtidos da relação entre velocidade acústica e limite de escoamento ($R^2 = 0,72$) e limite de resistência a tração ($R^2 = 0,84$) corroboram a relação entre esses dois parâmetros, principalmente, com o limite de resistência a tração, em que aproximadamente 84% da variabilidade no limite de resistência do material são explicados pela relação linear negativa com a velocidade da onda cisalhante.

Assim, de forma prática, através das equações de regressão mostrada na Figura 21(a-b), pode-se estimar os limites de escoamento e de resistência do material com uma precisão de $\pm 4,7$ e $\pm 5,2$ Mpa, respectivamente, a partir das medições de velocidade acústica.

Figura 21.(a) - Relação entre o limite de escoamento e a velocidade da onda ultrassônica.(b) Relação entre o limite de resistência à tração e a velocidade da onda ultrassônica. (c) Relação entre o alongamento e a velocidade da onda ultrassônica





Fonte: Autora, 2022.

4.4 CORRELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DA ONDA ULTRASSÔNICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS APÓS OS TRATAMENTOS TÉRMICOS

A Tabela 6 mostra os resultados de propriedades mecânicas determinados por ensaio de tração em três corpos de provas sem tratamento térmico (STT) e após tratamentos térmicos, assim com suas respectivas velocidades de onda ultrassônica cisalhante.

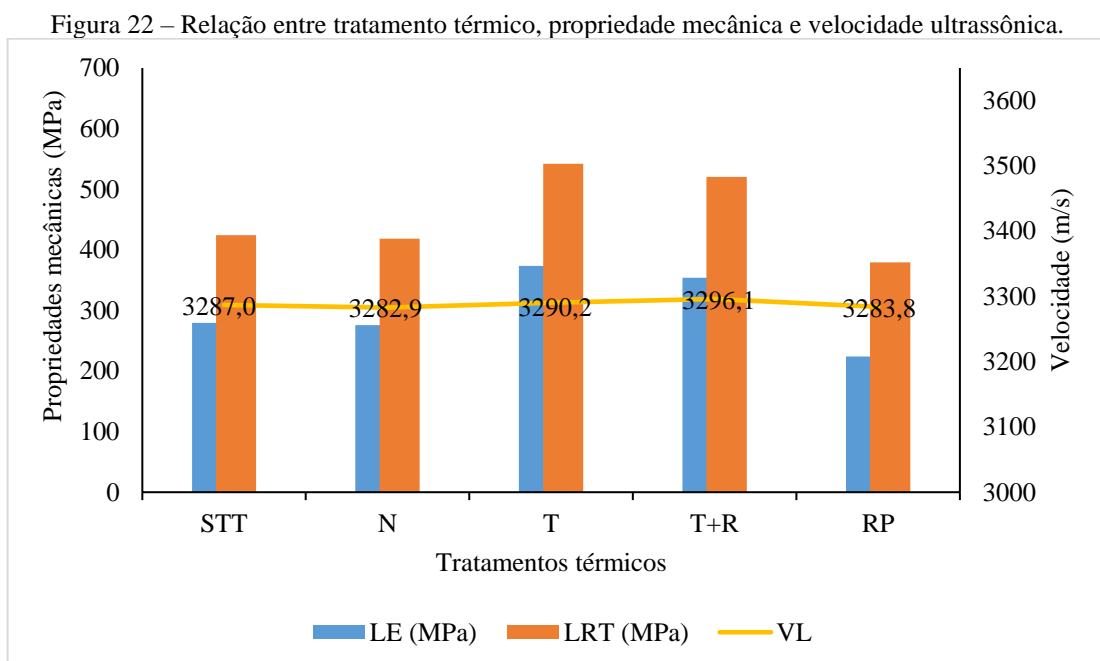
Tabela 6 – Propriedades mecânicas e velocidade de onda do material pós-tratamentos térmicos.

Corpo de prova	Propriedades mecânicas			Velocidade da onda cisalhante (m/s)
	LE (MPa)	LRT (MPa)	Alongamento (%)	
STT	279,5	424,2	25,1	3287,0
N	275,9	418,3	26,5	3282,9
T	373,4	542,0	14,0	3290,2
T+R	353,8	520,2	16,6	3296,1
RP	223,9	379,3	27,3	3283,8

Fonte: Autora, 2022.

Os resultados da Tabela 6, com exceção do alongamento, são mostrados na Figura 22. Nessa figura, verifica-se que o limite de escoamento e o limite de resistência são maiores para

os tratamentos de têmpera e têmpera seguido do revenido, os quais estão coerentes com a literatura e que pode ser comprovado pelo tamanho de grão resultante desses tratamentos (Figura 20(c,d)), pois quanto menor o tamanho de grão maior as propriedades mecânicas, resultado também encontrado por (MUTLU, 2013). Verifica-se também na Figura 22, que a velocidade da onda é levemente maior para esses dois tipos de tratamentos quando comparados com o material sem tratamento térmico, provavelmente esse fato está relacionado com o tamanho de grão. Essa relação direta entre tamanho de grão e velocidade de onda cisalhante também foi encontrada por (PALANAMICHY, 1995; MUTLU, 2013).



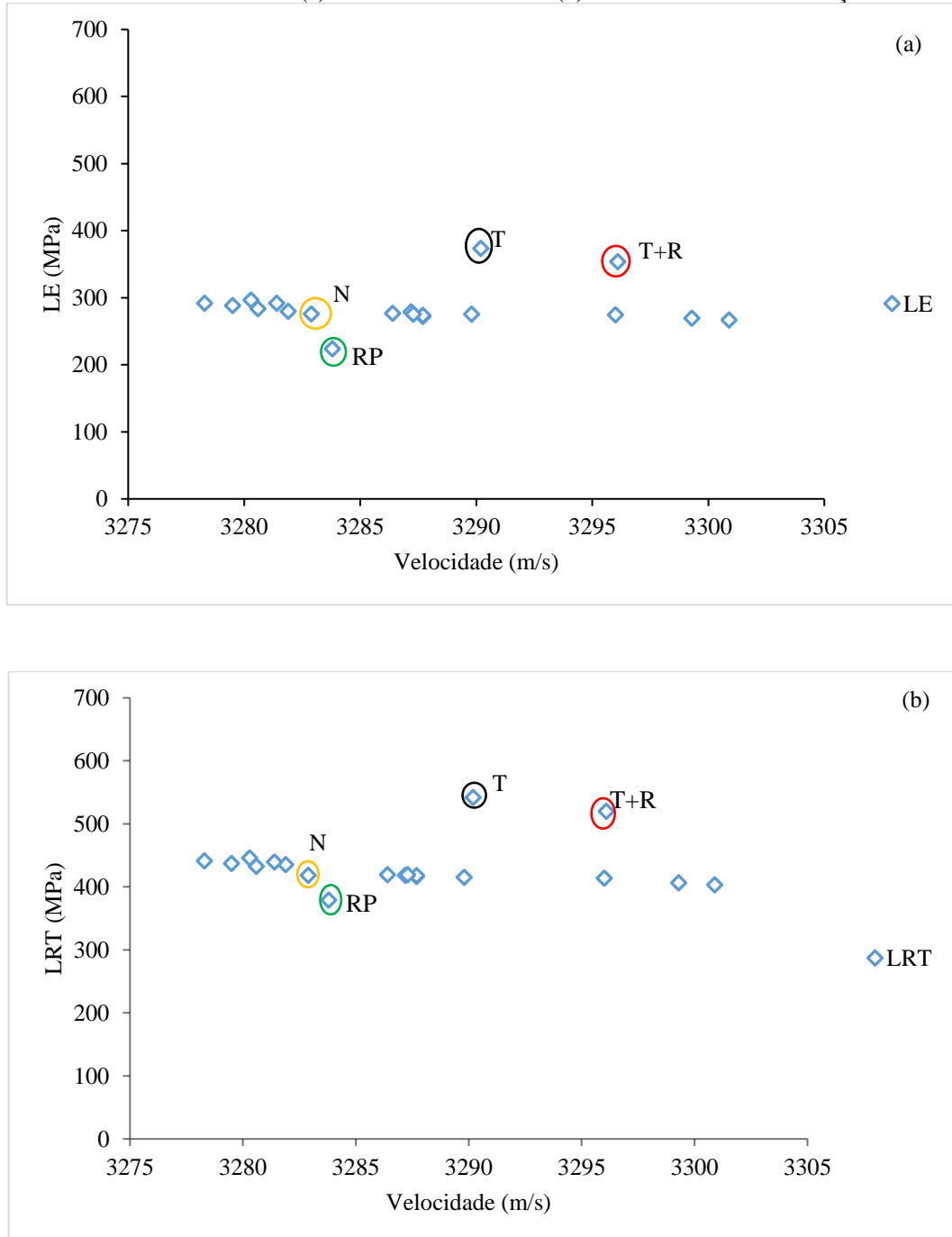
Fonte: Autora, 2022.

A Figura 23(a-b) faz um comparativo entre os resultados das medidas de velocidade da onda cisalhante nas 15 amostras como recebidas e nas amostras tratadas, mostrando a relação entre a velocidade acústica e os limites de escoamento e de resistência à tração. Consta-se pela figura que os limites de escoamento e de resistência à tração para o material termicamente tratado, são em quase toda sua totalidade diferenciados dos obtidos no material como recebido, conforme o esperado.

Constata-se também que através de velocidade sonora não houve a possibilidade de se diferenciar materiais com diferentes tamanhos de grão, conseqüentemente, diferentes propriedades mecânicas, uma vez que a velocidade se comporta de forma semelhante no aço ASTM A131 nas duas condições, com e sem tratamentos térmicos. De qualquer forma, esses resultados indicam que antes se utilizar a velocidade do material como recebido de apenas três

amostras, como consta nos resultados da Tabela 5 e onde mostra que há distinção entre velocidade e propriedades mecânicas, deve-se realizar medições numa quantidade e maior de material para ser ter resultados confiáveis e assim, a técnica ultrassônica ser usada com eficiência.

Figura 23 - Comparativos entre velocidade acústica e propriedades mecânicas obtidos em amostras com e sem tratamentos térmicos. (a) Limite de escoamento. (b) Limite de resistência a tração.



5 CONCLUSÕES

Uma avaliação das potencialidades da técnica ultrassônica, considerando a medição da velocidade ultrassônica, foi apresentada, como abordagem não destrutiva para a predição de propriedades mecânicas do aço ASTM A131. Após análise dos resultados, é possível concluir:

1. Foi demonstrado que os limites de escoamento e de resistência a tração do aço como recebido e a velocidade ultrassônica estão correlacionados inversamente. Essas propriedades diminuem com o aumento da velocidade ultrassônica.

2. A previsão de propriedades mecânicas, limites de escoamento e de resistência a tração do aço com base na velocidade ultrassônica é possível para o material sem tratamento térmico. Por exemplo, considerando a Norma ASTM A131/A131M - 14 para o aço A131 Grau A que determina uma faixa correspondente ao limite de resistência de 400 - 520 MPa e um mínimo de 235 MPa para o limite de escoamento, além de um alongamento mínimo de 21% para uma barra de 200 mm de comprimento e 8 mm de espessura, pode-se usar o método de inspeção não destrutiva para garantir que as características mecânicas estejam de acordo com as especificadas pela norma no aço.

3. Existe uma correlação direta, porém muito fraca entre a velocidade sonora e o percentual de alongamento, inviabilizando o uso da técnica ultrassônica para a previsão dessa propriedade mecânica do aço.

4. Em relação a estimativa das propriedades mecânicas, constatou-se que para o material como recebido, a técnica ultrassônica, mostrou-se efetiva para esse tipo de aplicação, sendo para a determinação dos limites de escoamento e resistência com um desvio de no máximo, $\pm 4,7$ e $\pm 5,2$ MPa, respectivamente, obtido da regressão linear.

5. Para uma quantidade de três amostras do aço como recebido e tratado por normalização, recozimento pleno, têmpera e têmpera seguido do revenido foi possível aplicar a técnica ultrassônica para caracterizar o material quanto ao tamanho de grão e propriedade mecânica como foi verificado através da diferença da velocidade. Porém, para as 15 amostras do material como recebido em conjunto com as amostras tratadas, a caracterização mecânica não foi possível, uma vez que valores de velocidade sonora era comum para as duas condições do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, Bongyoung; LEE, Seung Seok. Effect of microstructure of low carbon steels on ultrasonic attenuation. **IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**, v. 47, n. 3, p. 620-629, 2000.

AHN, Bongyoung et al. Application of the acoustic resonance method to evaluate the grain size of low carbon steels. **NDT & E International**, v. 32, n. 2, p. 85-89, 1999.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. 2011. Disponível em: <[http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20\(1\).pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20(1).pdf)>. Acesso em: 13 ago. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A131 / A131M-14: Standard specification for structural steel for ships. West Conshohocken, PA, Eua: Astm, p. 6, 2014.

ASTM A131/A131M - 15, **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 494**: Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 1996b.

BADIDI, A. B.; LEBAILI, S.; BENCHALA, A. **Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation**. NDT & E International, v.36, pp. 1-5, 2003.

BERUTTI, F. A. **Aplicação de métodos de ultrassom para avaliação e caracterização da microestrutura de materiais cerâmicos a base de alumina e suas associações com propriedade mecânica**. Tese para o doutorado em Engenharia de materiais na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

BITTENCOURT, M. S. Q. **Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido da onda ultrassônica e análise do estado de tensões em materiais 185 metálicos pela técnica da birrefringência acústica**. 2000. 115f. Tese (Doutorado) - Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BRAGA, R. M. **Sondas para medir a espessura residual de tubos por ultra som**. Dissertação em engenharia mecânica, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2001.

BRUNATTO, S. F. **Introdução ao estudo dos aços**. Universidade Federal do Paraná. 2016. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Silvio/INTRODU%C3%87%C3%83O%20A%20ESTUDO%20DOS%20A%C3%87OS-Parte%203.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**, 1a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. ABM, 7ª edição, São Paulo, 2005.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo – 1974.

COSTA, E. S. **Avaliação de tensões residuais em soldas gmaw e gmaw-cw por birrefringência acústica e difração de raio x**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, 2017.

FARIAS, C. T. T. *Et al.* **Estudo da propagação das ondas de Lamb em chapas de alumínio com furos de diferentes profundidades**. 5th Pan American Conference for. NDT, Cancun, Mexico, 2-6 October 2011.

FISCHETTI A. J.; SCOTT R. C. 2007. **Basic ultrasound beam formation and instrumentation**. Clinical Techniques in Small Animal Practice. 1:90-92.

FONSECA, E. **Determinação indireta das propriedades mecânicas de aço ASTM A36 laminado com o uso de ultra-som**. Dissertação em mestrado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

FRAGA, R. S. **Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

FREITAS, V. L. A. **Avaliação da potencialidade das técnicas de ultra-som na caracterização de aços aisi e aço inoxidável duplex**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

GARCIA, A.; SPIN, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio de materiais**. 2ª Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2012. 361p.

KOOPS, F. A. **Caracterização das propriedades mecânicas de tubo compósito por ultrassom**. 2013. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Minas), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

LU, J. **Handbook of Measurement of Residual stresses**, vol. 1, Bethel, ISBN: 978-0132557382. p. 22-319, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MUTLU, I.; OKTAY, E.; EKINCI, S. Characterization of microstructure of H13 tool steel using ultrasonic measurements. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 49, n. 2, p. 112-120, 2013.

NDT – **Nondestructive Testing Handbook**. Second edition, 7 vol., Ultrasonic Testing, 1991.

PALANICHAMY, P.; JOSEPH, A.; JAYAKUMAR, T.; RAJ, B. **Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel**. NDT & E International, v. 28, p.179-185, 1995.

SANTIN, J., **Ultrassom**, Técnica e aplicação, pág. 5-7, 93, 2003.

SILVA, R. N. J.F. Relatório Técnico de Projeto de Pesquisa. Avaliação do comportamento da velocidade da onda ultrassônica em aço estrutural com e sem tratamentos térmicos. UFPA, 2022.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**: Classificação e seleção de aços - 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 646p.

SILVA, A. P., **Estudo da transformação da austenita retida induzida por deformação, em um aço AISI 4340 com estrutura multifásica**, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos em materiais metálicos** – Fundamentos Teóricos e Práticos, São Paulo, Edgard Blücher, 1982

TITTMANN, B. R. **Ultrasonic measurements for the prediction of mechanical strength**. NDT International, 11, 2 ed, p 17-22, 1978.

TROMBINI, M. **Avaliação da técnica de ultrassom phased array para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados**. Campinas, SP, 2015.

ULTRASONIC. Testing of materials at level 2. IAEA, Vienna, 1988.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1970, 413 p.

ZOLIN, I. **Ensaio mecânicos e análises de falhas**. 3. ed. Santa Maria-RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

_____. **Desenho esquemático da tensão e deformação**. Disponível em:
<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5486413/course/section/6068833/aula%2018.pdf?time=1604970779168> Acesso em 29 de maio de 2022.