



PPGEM



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais  
Instituto Federal da Bahia

DEIVTON COSTA SANTIAGO

**INSPEÇÃO DE TUBOS INTERNOS DE TROCADORES DE  
CALOR BITUBULARES POR ULTRASSOM**

SALVADOR  
2023



PPGEM



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais  
Instituto Federal da Bahia

DEIVTON COSTA SANTIAGO

## **INSPEÇÃO DE TUBOS INTERNOS DE TROCADORES DE CALOR BITUBULARES POR ULTRASSOM**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do IFBA, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Costa da Silva  
Linha de Pesquisa: Caracterização e Integridade Estrutural

SALVADOR  
2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM  
OS DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

S235i Santiago, Deivton Costa

Inspeção de tubos internos de trocadores de calor bitubulares por ultrassom / Deivton Costa Santiago; orientador Ivan Costa da Silva -- Salvador, 2023.

79 p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.

1. Inspeção. 2. Ultrassom. 3. Bitubular. I. Silva, Ivan Costa da, orient. II. TÍTULO.

CDU 62-714

# INSPEÇÃO DE TUBOS INTERNOS DE TROCADORES DE CALOR BITUBULARES POR ULTRASSOM

DEIVTON COSTA SANTIAGO

Dissertação submetida ao corpo docente do Instituto Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em engenharia de materiais

Documento assinado digitalmente  
 IWAN COSTA DA SILVA  
Data: 12/07/2023 14:05:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientador: Prof., Dr. Ivan Costa da Silva - IFBA.

Documento assinado digitalmente  
 CLAUDIA TERESA TELES FARIAS  
Data: 12/07/2023 13:59:15-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof., Dra. Cláudia T. T. Farias - IFBA.

Documento assinado digitalmente  
 DAVI FRANCO REGO  
Data: 10/07/2023 19:17:31-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof., Dr. Davi Franco Rego – IFBA.

Documento assinado digitalmente  
 CARLOS OTAVIO DAMAS MARTINS  
Data: 10/07/2023 12:45:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof., Dr. Carlos Otávio Damas Martins – UFS.

SALVADOR  
2023

Resumo da qualificação da pesquisa apresentada ao IFBA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

## **INSPEÇÃO DE TUBOS INTERNOS DE TROCADORES DE CALOR BITUBULARES POR ULTRASSOM**

DEIVTON COSTA SANTIAGO

Junho/2023

Orientador: Prof., Dr. Ivan Costa da Silva.

Programa: Engenharia de Materiais

Trocadores de calor do tipo bitubular são empregados na indústria petroquímica para a refrigeração ou aquecimento de fluidos de processo. Sua estrutura consiste em dois tubos concêntricos em que o fluido de refrigeração flui no espaço entre as paredes e o fluido de processo no interior do tubo interno. Estes equipamentos trabalham com grandes variações de temperatura e estão sujeitos a processos corrosivos provocados pelo fluido de refrigeração. Para o tubo externo, a medição de espessura por ultrassom pode ser feita de forma simples. Na medição da espessura de parede do tubo interno, pode-se inspecionar por uma janela de visita, com a desvantagem de não se ter uma medida exata da integridade do equipamento. Outro método empregado é a técnica *IRIS* (do inglês *Internal Rotary Inspection System*), contudo há a necessidade da abertura, parada e alagamento do trocador incorrendo em perdas na produção, além da incerteza nos resultados devido à dificuldade da limpeza do tubo em função das condições de processo. Por fim, pode-se medir a espessura desmontando todo o trocador, sendo este o mais desvantajoso método, em função dos custos envolvidos. Neste trabalho, é proposto uma nova metodologia para a determinação da perda de espessura no espaço anular entre tubos a partir da parede externa, empregando um transdutor de ultrassom do tipo normal. Para tal, foram fabricados dois corpos de prova. O primeiro com o propósito de ajustar o procedimento de inspeção e validar os resultados. O segundo corpo de prova foi fabricado para reproduzir uma condição real, utilizando para isto um tubo interno que operou por quinze anos. Os resultados obtidos em laboratório apresentam a viabilidade da metodologia proposta e seus benefícios para garantia da integridade deste tipo de equipamento.

**Palavras-chave:** Inspeção. Ultrassom. Bitubular.

Abstract of the research qualification submitted to the IFBA as part of the requirements for obtaining a master's degree in Materials Engineering.

## **INSPECTION OF INTERNAL TUBES OF BITUBULAR HEAT EXCHANGERS BY ULTRASOUND.**

DEIVTON COSTA SANTIAGO

Jun/2023

Advisor: Prof., Dr. Ivan Costa da Silva.

Department: Materials Engineering

Bitube heat exchangers are widely used in the petrochemical industry to either cool or heat process fluids. The structure of these heat exchangers comprises of two concentric tubes, with the coolant flowing in the space between the walls and the process fluid circulating inside the inner tube. These heat exchangers operate under significant temperature variations and are susceptible to corrosion caused by the coolant. Ultrasonic thickness measurement can be easily conducted on the outer tube. However, measuring the wall thickness of the inner tube requires inspection through a viewing window, which results in the disadvantage of imprecise measurements of the equipment's integrity. Although the IRIS (Internal Rotary Inspection System) technique can be used, it requires stopping and flooding the exchanger, which leads to production losses and uncertain results due to the difficulty of cleaning the tube based on the process conditions. Alternatively, the thickness can be measured by disassembling the entire exchanger, which is the most disadvantageous method, due to the costs involved. This study proposes a novel methodology for determining the thickness loss in the annular space between tubes from the external wall, using a normal ultrasound transducer. Two specimens were manufactured for this purpose. The first specimen was designed to adjust the inspection procedure and validate the results, while the second specimen was created to reproduce a real condition, using an inner tube that had been in operation for fifteen years. The experimental results demonstrate the feasibility of the proposed methodology and its benefits in ensuring the integrity of this type of equipment.

**Keywords:** Inspection. Ultrasound. Bitubular.

*Para minhas amadas filhas Malu e Bella como  
exemplo de que o conhecimento liberta e  
transforma, e como inspiração para superar as  
adversidades presentes na nossa caminhada.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela oportunidade de dar mais um passo importante na minha vida.

Ao meu Orientador Ivan Costa da Silva, sobretudo pela paciência e por me encorajar nos momentos de oscilação da motivação.

Ao PPGEM, pelo fomento de uma pós-graduação tão importante para os profissionais da indústria.

Ao meu amigo e Inspetor de integridade Márcio Paulo, pelo apoio na realização dos ensaios e transferência de conhecimentos relacionados a ultrassom.

Aos meus pais, pelo apoio desde a infância, me fazendo acreditar que o estudo e o conhecimento, além de necessário são as nossas maiores riquezas.

A minha esposa e filhas, por todo apoio.

## SUMÁRIO

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO .....	13
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 Geral .....	14
1.1.2 Específicos .....	14
1.2 APRESENTAÇÃO .....	15
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1 PRODUÇÃO DE POLIETILENO .....	16
2.2 TROCADORES DE CALOR .....	18
2.2.1 Trocadores de calor do tipo casco e tubo .....	19
2.2.2 Trocadores de calor bitubulares .....	20
2.3 TROCADORES DE CALOR BITUBULAR APLICADOS A PRODUÇÃO DE POLIETILENO .....	21
2.3.1 Materiais aplicados a trocadores de calor bitubulares de <i>SHP</i> .....	23
2.3.2 Corrosão-Erosão em trocadores de calor bitubulares aplicados na produção de polietileno.24	
2.4 MEDIÇÃO DE ESPESSURAS COM ULTRASSOM .....	25
2.4.1 Princípios básicos .....	25
2.5 TIPOS DE ONDA .....	27
2.5.1 Ondas longitudinais (ou de compressão) .....	27
2.5.2 Ondas Transversais .....	28
2.5.3 Ondas superficiais .....	29
2.6 INCIDÊNCIA DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS EM DIFERENTES MEIOS DE PROPAGAÇÃO .....	31
2.7 LEI DE SNELL .....	32
2.8 EQUIPAMENTOS DE ULTRASSOM .....	34
2.9 GANHO .....	34
2.10 TRANSDUTORES .....	35
2.10.1 Reto ou normal .....	35
2.10.2 Angular .....	36
2.10.3 Duplo-cristal .....	36
2.10.4 Phased-array .....	37
2.11 APARELHOS UTILIZADOS NA INSPEÇÃO POR ULTRASSOM NA FORMA A-SCAN .....	38
2.12 MÉTODO DE INSPEÇÃO PULSO ECO .....	38
2.13 MÉTODO DE INSPEÇÃO POR IMERSÃO .....	39
2.14 ENSAIO DE ULTRASSOM IRIS - INTERNAL ROTARY INSPECTION SYSTEM .....	41
2.15 ATENUAÇÃO DA ONDA .....	42
2.16 NORMA REGULAMENTADORA 13 .....	43
2.17 INSPEÇÃO DE TROCADORES DE CALOR DE SUPER ALTA PRESSÃO APLICADOS PRODUÇÃO DE POLIETILENO .....	44
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA .....	47
3.1 PROJETO DOS CORPOS DE PROVA .....	48
3.2 PROJETO DE CP1 .....	48
3.3 PROJETO DE CP2 .....	49
3.4 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	50
3.4.1 Fabricação de CP1 .....	50
3.4.2 Fabricação de CP2 .....	53

3.5	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS PARA CAPTAÇÃO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS NA FORMA A-SCAN. ....	54
3.6	EXECUÇÃO DOS ENSAIOS UTILIZANDO ULTRASSOM EM CP1 E CP2 .....	55
3.6.1	Configuração experimental da medição por ultrassom A-scan.....	55
3.6.2	Procedimento para execução dos ensaios .....	56
3.6.3	Preparação e realização dos ensaios em CP1 .....	58
3.6.4	Método para análise dos sinais .....	58
3.7	CÁLCULO DA ESPESSURA DO TUBO INTERNO DE CP1 .....	59
3.8	ENSAIOS COM ULTRASSOM NO FORMATO A-SCAN EM CP2 .....	61
	CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	62
4.1	RESULTADOS PARA CP1 .....	62
4.2	RESULTADOS PARA CP2.....	64
	CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES .....	69
	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Fluxo de produção de polietileno. ....	17
<b>Figura 2</b> - Produtos fabricados em polietileno. ....	18
<b>Figura 3</b> - Trocador de calor tipo casco e tubos. ....	19
<b>Figura 4</b> - Passe de um trocador de calor bitubular e seu esquema de funcionamento. ...	21
<b>Figura 5</b> - Trocador de calor bitubular tipo serpentina. ....	21
<b>Figura 6</b> - Trocador de calor Bitubular de SHP em planta petroquímica. ....	22
<b>Figura 7</b> - Corrosão-erosão em trocador de calor tipo bitubular aplicado a produção de polietileno: (a) na parede externa do tubo interno; (b) na parede interna do tubo externo. ....	25
<b>Figura 8</b> - Classificação das zonas de campo sônico. ....	26
<b>Figura 9</b> - Ondas longitudinais. ....	28
<b>Figura 10</b> - Ondas transversais. ....	28
<b>Figura 11</b> - Ondas de Rayleigh. ....	29
<b>Figura 12</b> - Ondas de Love. ....	30
<b>Figura 13</b> - Ondas incidentes e refletidas em diferentes meios. ....	31
<b>Figura 14</b> - Ondas refratadas e refletidas nos meios 1 e 2. ....	33
<b>Figura 15</b> - Tipo de onda e intensidade em função do ângulo de incidência. ....	34
<b>Figura 16</b> - Transdutor reto. ....	36
<b>Figura 17</b> - Transdutor angular. ....	36
<b>Figura 18</b> - Transdutor duplo cristal. ....	37
<b>Figura 19</b> - Transdutor phased-array. ....	37
<b>Figura 20</b> - Representação gráfica A-scan. ....	38
<b>Figura 21</b> - Método pulso-eco. ....	39
<b>Figura 22</b> - Inspeção por ultrassom por imersão. ....	40
<b>Figura 23</b> - Comportamento do sinal da onda sônica na inspeção por imersão em configuração pulso-eco. ....	41
<b>Figura 24</b> - (a). Sonda IRIS no interior de um tubo. (b) Propagação da onda pelo interior do tubo, (c) Transmissão da onda para a parede do tubo, (d) Onda refletida com informação da espessura de parede. ....	42
<b>Figura 25</b> - Abertura de janela no trocador bitubular de SHP. ....	44
<b>Figura 26</b> - Janela de inspeção projetada em trocador de calor de SHP. ....	45

<b>Figura 27</b> - Tubos externos (a) e internos (b).	45
<b>Figura 28</b> - Curvas desmontadas para inspeção por IRIS.	46
<b>Figura 29</b> - Fluxo de trabalho planejado para os experimentos.	47
<b>Figura 30</b> - Projeto de Corpo de prova 1.	48
<b>Figura 31</b> - Tubo interno de CP2.	49
<b>Figura 32</b> - Projeto do Corpo de prova 2.	50
<b>Figura 33</b> - Rebaixos do tubo interno	50
<b>Figura 34</b> - Medição de espessura em CP1	51
<b>Figura 35</b> - Medidor de espessura DM4 DL e transdutor DA 301.	51
<b>Figura 36</b> - Calibração do equipamento com bloco padrão.	52
<b>Figura 37</b> - Tubos centralizados.	53
<b>Figura 38</b> - Geratrizes puncionadas e linhas longitudinais traçadas.	53
<b>Figura 39</b> - Medição de espessura inicial para tubo interno de CP2.	54
<b>Figura 40</b> - Geratrizes dos tubos e dos corpos de prova.	56
<b>Figura 41</b> - Configuração experimental para medição de espessura de CP1 e CP2 e equipamentos utilizados.	56
<b>Figura 42</b> - Pontos de referência em CP1.	58
<b>Figura 43</b> - Linhas e pontos de referência para CP2.	58
<b>Figura 44</b> - Enchimento do corpo de provas com água.	59
<b>Figura 45</b> - Esquema de captura e análise dos sinais.	60
<b>Figura 46</b> - Sinal <i>A-ScanN</i> gerado no Scilab®.	60
<b>Figura 47</b> - Ensaio de ultrassom pulso eco em CP2.	62
<b>Figura 48</b> - Valores de espessuras medidos x Calculados para CP1 e o erro (%)	64
<b>Figura 49</b> - Resultados para CP2 – Geratriz A.	64
<b>Figura 50</b> - Resultados para CP2 – Geratriz B.	64
<b>Figura 51</b> - Resultados para CP2 – Geratriz C.	65
<b>Figura 52</b> - Resultados para CP2 – Geratriz D	66
<b>Figura 53</b> - Resultados para CP2 – Geratriz E.	66
<b>Figura 54</b> - Resultados para CP2 – Geratriz F.	69

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Tipos de trocadores de calor.....	19
<b>Tabela 2</b> - Dados de projeto e operação para um trocador de calor bitubular de SHP. ....	22
<b>Tabela 3</b> - Propriedade mecânica do aço ASTM A36. (SILVA et al., 2008). ....	23
<b>Tabela 4</b> - Dimensões dos rebaixos em CP1. ....	48
<b>Tabela 5</b> - Itens de CP1. ....	49
<b>Tabela 6</b> - Itens de CP2. ....	50



## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O cenário industrial brasileiro tem sido desafiado a procurar novas formas de produzir e manter seus ativos, de forma a tornar competitivo os seus produtos no mercado interno e externo. Sendo assim, todos os ramos industriais têm trabalhado para otimizar seus processos, visando uma maior produtividade tanto do ponto de vista de manter como de operar seus ativos.

As plantas petroquímicas não são diferentes, suas características construtivas onerosas exigem constantemente o desafio de se ter processos de manutenção que possam otimizar seus custos, manter a confiabilidade dos ativos, a segurança das pessoas e dos processos, além da boa operabilidade. Neste contexto, as inspeções em grandes equipamentos têm se mostrado sempre um ponto de oportunidade de ganhos de produtividade, diminuição da indisponibilidade das unidades de produção e, sobretudo diminuição de custos de execução, tanto no preparo como na execução destas verificações que garantem a integridade dos equipamentos.

Mais especificamente falando em unidades de petroquímicas de produção de polietileno que operam com pressões muito altas acima de 2000 bar, intituladas plantas de super alta pressão, onde os materiais aplicados na fabricação de equipamentos são muito nobres e conseqüentemente muito caros, os cuidados com a integridade destes equipamentos precisam ser redobrados. Este caso corrobora ainda mais com a necessidade de inspecionar e corrigir possíveis problemas, ou prever a substituição dos equipamentos, o que precisa ser visto com muita antecedência frente aos altos valores envolvidos.

Na contramão estão as normas brasileiras vigentes que regulam e exigem a execução das inspeções e manutenções nos equipamentos. Uma delas é a NR 13 – Norma Regulamentar, que resguarda a proteção do trabalhador que atua com caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos (PORTAL DO MTE, 2014) - que determina entre outros pontos, a periodicidade de inspeção aos quais os equipamentos devem estar submetidos, ou seja, é necessário inspecionar, estar alinhado com a norma, independente das dificuldades de executar e dos valores envolvidos.

Um fator que ameniza os custos a médio e longo prazo é o fato de a unidade industrial ter o certificado de Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos - SPIE, o que pode dobrar o tempo entre inspeções, e diminuir os custos e indisponibilidade dos ativos, porém não elimina a necessidade das inspeções.

Dentro deste contexto, as unidades petroquímicas de produção de polietileno, com processos de Super Alta Pressão, possuem em suas instalações os trocadores do tipo bitubulares,

submetidos a pressões superiores a 2500 bar. Estes equipamentos são fabricados com o tubo interno em aço *AISI 4340 VAR*, de alto valor para aquisição, que precisam ser inspecionados conforme a NR13. Originalmente, estas inspeções são feitas medindo-se a espessura do tubo interno com ultrassom a partir de uma janela de visita no tubo externo, ou por *IRIS*, ou desmontando todo o trocador. Cada um destes métodos possui suas limitações, que por sua vez, conduzem a uma análise menos precisa da vida do equipamento e geram altos custos de manutenção e longos prazos de intervenção.

Este trabalho apresenta uma inovadora técnica de inspeção, onde é possível, a partir da técnica de ultrassom na forma A-scan, com o transdutor posicionado sobre o tubo externo, determinar a espessura do tubo interno do trocador de calor bitubular, sem que para isto seja necessária a desmontagem do trocador, nem os altos custos e prazos envolvidos nas outras técnicas.

Dentre as contribuições deste trabalho, destacam-se:

1. Desenvolvimento inicial de um novo método de inspeção de trocadores de calor bitubulares;
2. Aumento no número de medidas de espessura para uma determinação mais acurada da vida remanescente de trocadores bitubulares;
3. Otimização dos tempos de inspeção do equipamento, contribuindo para menor tempo de unidade de produção parada;
4. Redução dos custos envolvidos nas inspeções de trocadores de calor bitubulares.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Geral**

Este trabalho visa o desenvolvimento de técnicas avançadas de medição não invasiva de espessura de parede remanescente do tubo interno de um trocador de calor bitubular, através da técnica ultrassônica.

### **1.1.2 Específicos**

Como objetivos específicos têm-se:

- Desenvolver um método inovador que possibilite a medição de espessura do tubo interno de um trocador de calor bitubular de uma planta de produção de polietileno a altas pressões, otimizando custos e prazos envolvidos na inspeção do equipamento;

- Contribuir para um melhor planejamento de custos de uma unidade industrial, a partir da identificação da necessidade de reparos, substituições parciais ou total de equipamentos com grandes valores envolvidos, seja de manutenção, projeto ou investimentos;
- Aumentar a segurança de processos e de pessoas, a partir de uma maior confiabilidade dos resultados de medição de espessura do tubo interno dos trocadores de calor bitubulares;
- Otimizar tempos de paradas de planta por necessidade de inspeções mais demoradas e mais complexas, atualmente utilizadas;
- Diminuir custos de manutenção com inspeções, a partir da menor necessidade de preparativos e recursos humanos, como os atualmente empregados;
- Aumentar a confiabilidade do equipamento a partir de um conjunto de medidas de espessuras mais amplo.

## **1.2 APRESENTAÇÃO**

O CAPÍTULO 2 traz a revisão bibliográfica e os conceitos acerca da teoria sobre o tema, iniciando com a descrição da produção de polietileno e seguindo com os conceitos relacionados os trocadores de calor, trocadores de calor bitubulares, os fundamentos dos ensaios de ultrassom, o funcionamento dos equipamentos, a Norma Regulamentadora 13 e os métodos atuais de inspeção em trocadores de calor bitubulares.

No CAPÍTULO 3 é apresentada a metodologia aplicada, enfatizando o planejamento para execução dos experimentos, a estratégia da fabricação de corpos de prova, a configuração experimental aplicada, os equipamentos utilizados e o procedimento de execução dos experimentos.

O CAPÍTULO 4 apresentam-se os resultados e as discussões, mostrando a análise dos valores obtidos com a técnica de inspeção proposta. Um comparativo dos resultados do primeiro corpo de prova com os resultados do segundo corpo de prova, também é avaliado. Além disso, são apresentadas discussões a respeito da aplicabilidade do método e a confiabilidade dos resultados obtidos.

No CAPÍTULO 5 apresentam-se as conclusões obtidas e ratifica a confiabilidade e aplicabilidade futura para o método apresentado neste trabalho.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PRODUÇÃO DE POLIETILENO

Polietileno é um polímero parcialmente cristalino, flexível, cujas propriedades são acentuadamente influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina. As menores unidades cristalinas, lamelas, são planares e consistem em cadeias perpendiculares ao plano da cadeia principal e dobradas em zig-zag, para cada 5 a 15nm, embora haja defeitos que são pouco frequentes (DOAK, 1986).

Sua utilização é voltada a aplicações de bens de consumo não duráveis, diferentemente dos “plásticos de engenharia” (poliamida (PA), policarbonato (PC), politereftalato de etileno (PET), entre outros), que são aplicados como materiais específicos em situações que exigem elevada durabilidade. Em referência à estrutura química, o polietileno, em sua forma mais simples, consiste em uma longa estrutura primária formada por um número par de carbonos covalentemente ligados com átomos de hidrogênio ligados à cada átomo de carbono (VIEZZER,2014).

Dependendo das condições reacionais e do sistema catalítico empregado na polimerização, cinco tipos diferentes de polietileno podem ser produzidos:

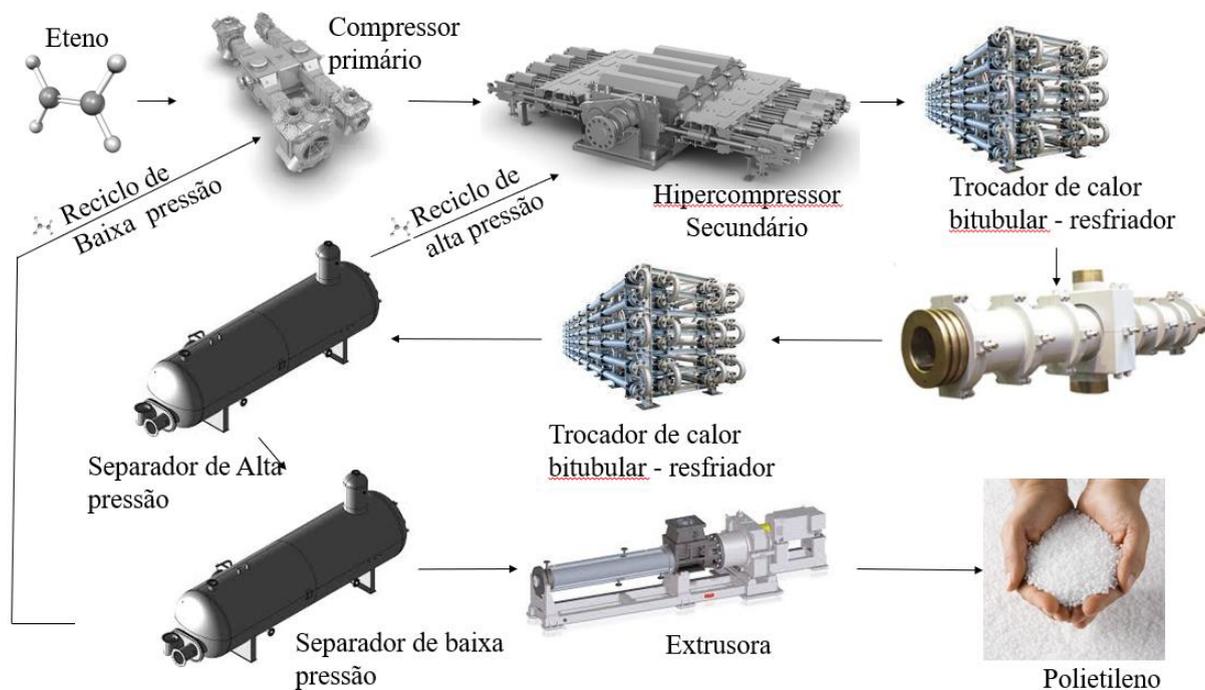
- Polietileno de baixa densidade (PEBD ou *LDPE*);
- Polietileno de alta densidade (PEAD ou *HDPE*);
- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou *LLDPE*);
- Polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM ou *UHMWPE*);
- Polietileno de ultrabaixa densidade (PEUBD ou *ULDPE*).

O polietileno de baixa densidade (PEBD) é um polímero obtido a partir da eteno exclusivamente por um mecanismo de polimerização via radical livre a altas pressões. As propriedades características do PEBD o tornam um material bastante apropriado para a fabricação de filmes por sopro, que correspondem a mais da metade de seu consumo. O PEBD é um polímero semicristalino, que apresenta um grau de cristalinidade de 50% a 60%, ou seja, 50% a 60% de sua estrutura molecular possui um arranjo regular, sendo a parte restante, amorfa (não apresenta ordenação espacial). O elevado grau de ramificações curtas no PEBD o faz resultar em um polietileno mais flexível e com menor ponto de fusão, entre 110°C e 115°C (COUTINHO et al., 2003).

O fluxo do processo produtivo de polietileno está esquematizado na Figura 1. São necessários vários equipamentos, dentre eles se destacam:

- 1) Compressor primário – Recebe eteno de centrais petroquímicas e eleva a pressão de 30 para 250 bar;
- 2) Hiper-compressor secundário – Recebe eteno a 30 bar e eleva até cerca de 2500 bar;
- 3) Trocador de calor bitubular de resfriamento – Tem a função de resfriar o eteno para entrada no reator autoclave;
- 4) Reator Autoclave – Tem a função de receber eteno a altas pressões e com a adição de catalisadores, transformar o eteno em uma mistura de polímero e gás eteno;
- 5) Separador de alta pressão – Recebe a mistura vinda do reator em alta pressão e faz uma separação entre gás e polímero. O gás eteno recuperado segue de volta para o hiper compressor secundário e o polímero ainda com uma quantidade de gás segue para o separador de baixa pressão;
- 6) Separador de baixa pressão – Recebe o polímero a baixa pressão e separa o gás eteno restante do polímero. Na sequência o gás eteno recuperado retorna ao compressor primário e o polímero segue para extrusora;
- 7) Extrusora – Recebe o polímero fluido, extruda, solidifica e corta, finalizando a produção do polietileno em *pellets*.

**Figura 1** - Fluxo de produção de polietileno.



Fonte: De autoria própria.

O polietileno em pellets é a matéria prima para a fabricação de vários produtos, para as mais diversas indústrias. A Figura 2 ilustra alguns exemplos de aplicação.

**Figura 2** - Produtos fabricados em polietileno.



Embalagens



Caixa d'água



Filme *stretch*



Peças



Embalagens longa vida



Peças de veículos

Fonte: De autoria própria.

## 2.2 TROCADORES DE CALOR

Trocadores calor são equipamentos largamente utilizados pela indústria, com a finalidade de transferir calor entre dois fluidos com diferentes temperaturas. Podem ser usados para aquecer um ambiente, na produção de potência, na recuperação de calor em processos de refino, em processamentos químicos e em várias outras aplicações (INCROPERA et al., 2007).

As correntes de fluidos escoam separadas fisicamente dentro de um dispositivo e, a troca térmica ocorre no sentido do fluido de maior temperatura para o fluido de menor temperatura. Embora não seja comum a denominação de trocadores de calor, existem dispositivos que realizam a troca térmica pelo contato direto, ou seja, os dois fluidos que realizarão a troca térmica se misturam (ÇENGEL, 2012).

Os trocadores de calor são classificados de acordo com os mecanismos de transferência térmica, o número de fluidos, as características de construção, entre outros fatores. De acordo com SHAH E SEKULIC (2003), os trocadores de calor podem ser divididos em: tubular (casco tubo, bitubular e espiral), placa (plana e não plana) e superfície estendida (placa aletada, tubo aletado) e regeneradores (rotativo e matriz fixa). A Tabela 1, apresenta esta classificação.

Tabela 1 - Tipos de trocadores de calor.

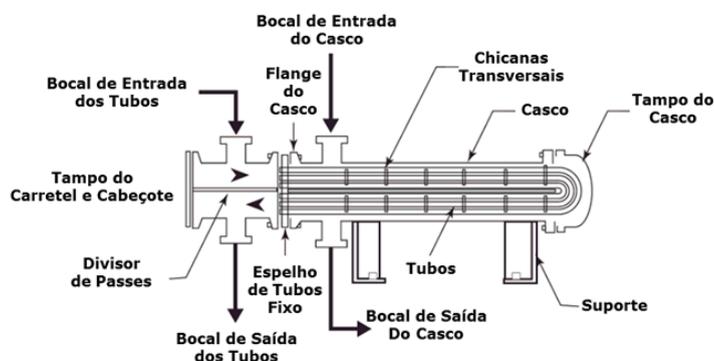
Classificação do trocador	Tipo
Tubular	Casco e tubos
	Bitubular
	Tubo em espiral
Placa	Plana
	Não plana
Superfície Estendida	Placa aletada ou cassete
	Tubo aletado
Regeneradores	Matriz fixa
	Rotativos

### 2.2.1 Trocadores de calor do tipo casco e tubo

Composto por um feixe de tubos que são envolvidos por um casco, em sua maioria cilíndrica, sendo que um fluido irá se movimentar no interior dos tubos e o outro no seu exterior. Esse tipo de construção que é exibida na Figura 3, é constituída por outros componentes como o cabeçote de entrada, o casco, o feixe de tubos e o cabeçote de saída (ABNT, 1991).

A utilização destes trocadores de calor teve início no século XX, sendo utilizado como aquecedores de água e condensadores dentro das centrais térmicas. Com o advento da indústria de petróleo e conseqüentemente da cadeia petroquímica, a necessidade de desenvolvimento destes equipamentos aumentou, gerando a demanda de novas tecnologias, modelagens, materiais e, sobretudo normatização.

Figura 3 - Trocador de calor tipo casco e tubos.



Fonte: REGO, 2015.

Neste contexto surgiu a *TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association)* (9th Ed - 2007) que contém condições e recomendações para o projeto, seleção de materiais, testes, instalação e operação de trocadores de calor. A *TEMA* engloba tanto o projeto mecânico como o projeto térmico. Além de que, esta norma não exclui, e sim, complementa o código *ASME*, Seção VIII, Divisão 1, para vasos de pressão; com a finalidade de complementar requisitos peculiares dos trocadores de calor (TELLES, 1996).

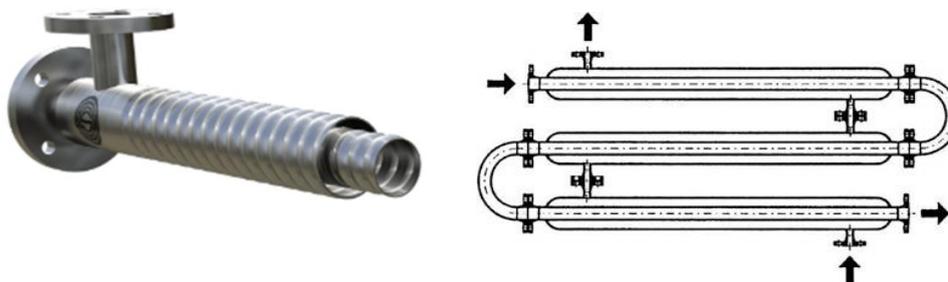
As vantagens da utilização deste tipo de trocadores são: a geometria cilíndrica permitir suportar pressões de funcionamento elevadas, de até 300 bar no corpo e cerca de 1400 bar nos tubos; uma ampla gama de temperaturas de operação, desde os - 100°C até 600°C; extrema robustez e concepção flexível, podendo ser construídos com diversos materiais e utilizar um grande número de fluídos. Como principal desvantagem, tem-se a necessidade de uma área de instalação relativamente grande, pois os trocadores são normalmente montados na horizontal, requerendo o dobro do comprimento para poder desmontar o feixe de tubos para execução de limpeza. Para pressões de funcionamento inferiores a 16 bar e temperaturas inferiores a 200°C, a construção torna-se mais dispendiosa do que trocadores de placas (AZEVEDO, 2005).

### **2.2.2 Trocadores de calor bitubulares**

O trocador de calor do tipo bitubular é formado por dois tubos concêntricos, normalmente com trechos retos e com conexões nas extremidades de cada tubo para transferir os fluidos de uma seção reta para outra. Assim, um fluido escoar pelo tubo interno e outro, pelo espaço anular, a troca de calor ocorre através da parede do tubo interno. Suas vantagens são: facilidade de construção e de montagem, ampliação de área, facilidade de manutenção e de acesso para limpeza (BEJAN, 1996).

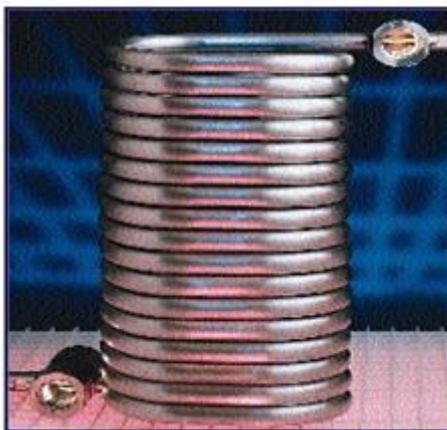
Quanto a sua forma construtiva, podem se apresentar com tubos montados concêntricamente, formando passes horizontais e interligados por Spools, conforme ilustra a Figura 4, ou também em forma de espiral conforme a Figura 5, sendo frequentemente utilizado por ocupar pouco espaço no local de instalação.

**Figura 4** - Passe de um trocador de calor bitubular e seu esquema de funcionamento.



Fonte: KERN, 1980.

**Figura 5** - Trocador de calor bitubular tipo serpentina.



Fonte: BARTLETT, 1996.

A fabricação desses trocadores de calor deve respeitar normas técnicas internacionalmente aceitas, como: A.S.M.E. - *American Society of Mechanical Engineers*; T.E.M.A. - *Tubular Exchanger Manufacturers Association*; D.I.N. - *Deutsches Institut für Normung*; J.I.S. - *Japanese Industrial Standards*; A.B.N.T. - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

### 2.3 TROCADORES DE CALOR BITUBULAR APLICADOS A PRODUÇÃO DE POLIETILENO

Trocadores de calor tipo duplo tubo ou bitulares são amplamente utilizados na indústria petroquímica para aquecimento ou arrefecimento de fluidos de processo, quando são necessárias pequenas áreas de transmissão térmica. Esses trocadores também podem ser utilizados para ebulição ou condensação de pequenas quantidades de fluido.

Mais especificamente, os trocadores aplicados à produção de polietileno, operam com pressões que variam de 1500 até 3500 bar e são subclassificações como trocadores bitubulares de *SHP*, do inglês *Super high pressure*. A Figura 6 ilustra um trocador utilizado neste processo. Neste equipamento, o tubo interno é o tubo de processo, em que passa gás a alta pressão. O tubo externo é o tubo de fluido de troca térmica, onde passa água ou vapor, dependendo da etapa do processo produtivo.

**Figura 6** - Trocador de calor Bitubular de SHP em planta petroquímica.



Fonte: De autoria própria.

Estes trocadores operam sob condições de processos extremas, quando aplicados a produção de polietileno de baixa densidade com a tecnologia autoclave. A Tabela 2 apresenta estas condições para um trocador aplicado ao resfriamento ou aquecimento de eteno, antes da entrada no reator de polimerização.

**Tabela 2** - Dados de projeto e operação para um trocador de calor bitubular de SHP.

<b>Especificação técnica</b>	<b>Tubo interno</b>	<b>Tubo externo</b>
Pressão de projeto	3500 bar	22 bar
Pressão de operação	2200 bar	14,7 bar
Temperatura máxima de projeto	300°C	200°C
Fluidos	Eteno	Água gelada ou vapor
Material	AISI 4340 VAR	ASTM A36
Categoria NR 13	I	IV

### 2.3.1 Materiais aplicados a trocadores de calor bitubulares de SHP

No tubo externo, em função das condições de processo que não requerem altas solicitações, geralmente são utilizados aços mais comuns como o *ASTM A36*. Este aço tem como característica principal o aço carbono em sua composição e é considerado um aço hipoeutetóide. O A36 é utilizado, geralmente, na parte estrutural de máquinas, implementos rodoviários, passarelas, entre outros. Um dos principais requisitos desse aço, é a homogeneidade, ductilidade, boa soldabilidade, suscetibilidades de corte a chama e uma resistência razoável a corrosão. Seu limite de resistência a tração varia de 390 a 490 MPa com alongamento em torno de 18% a 20% (DA SILVA, 2018). A Tabela 3 apresenta as principais propriedades mecânicas deste aço.

**Tabela 3** - Propriedade mecânica do aço ASTM A36. (SILVA et al., 2008).

Aço	Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
ASTM A36	250	400 a 550	18 a 20

No tubo interno é utilizado um aço nobre, devido as condições de processo extremamente críticas, sendo assim geralmente é usado o aço *AISI 4340 VAR*, que é um aço de médio carbono e baixa liga, de alta resistência/têmpera profunda.

Para o aço *AISI 4340 VAR*, foram direcionados muitos esforços no sentido de aumentar a ductilidade e a tenacidade através de melhorias nos processos de fusão e processamento, assim como nos processos de controle e inspeção. Aços com poucas e pequenas inclusões não metálicas e laminados com poucos defeitos internos superficiais são produzidos através do uso de matérias-primas controladas e técnicas de fusão avançadas, como *ESR* (do inglês *Electroslag Remelting*) e *VAR* – (do inglês *Vaccum Arc Remelting*). Com essas medidas conseguem-se menores variações de corrida para corrida, maiores valores de ductilidade e tenacidade e grande confiabilidade em serviço (ALMEIDA,1997).

O custo de aquisição de tubos em *AISI 4340 VAR* para trocadores de calor bitubulares aplicados à produção de polietileno é extremamente alto e isto influencia no preço final do trocador de calor, que atualmente passa de um milhão de dólares.

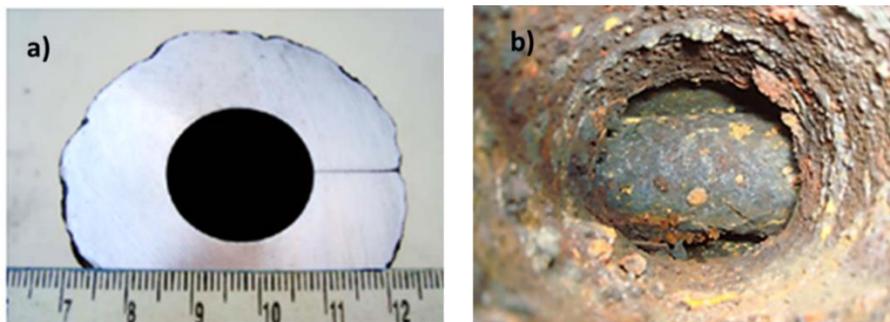
### **2.3.2 Corrosão-Erosão em trocadores de calor bitubulares aplicados na produção de polietileno.**

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação física, química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o meio em que se encontra leva a alterações prejudiciais e indesejáveis, sofridas pelo material, tais como: desgaste, transformações químicas ou modificações estruturais, tornando o material inadequado para o uso (CARVALHO E GENTIL, 2022).

Em função do fluido utilizado no processo e o fluxo ser turbulento no espaço anular entre o tubo de processo e o tubo troca térmica, trocadores de calor bitubulares estão sujeitos a corrosão-erosão, que é o ataque a um metal causado pelo movimento de um líquido corrosivo contra a sua superfície, ou seja, é um ataque que ocorre em equipamentos expostos a fluidos em movimento, sendo intensificado quando há a presença de partículas sólidas em suspensão (MCCAFFERTY, 2010).

Enquanto a erosão é considerada um fenômeno puramente mecânico de remoção ou destruição do metal, o processo de erosão-corrosão é definido como o aumento da corrosão devido ao choque de partículas contidas em um fluido (partículas sólidas em um líquido, gotas de líquido em um gás, partículas sólidas em um gás) em uma superfície sólida, como resultado do fluxo do fluido sobre a superfície (EFIRD, 1993). Portanto, é resultado da ação combinada da erosão mecânica com a corrosão, podendo ser considerado como corrosão acelerada por erosão mecânica do filme de corrosão protetor, sendo mais severo em meios bi ou multifásicos. A perda de massa resultante normalmente é bem superior à soma das perdas obtidas pela erosão e corrosão puras. Esta diferença é considerada como efeito de sinergia dos dois processos. As Figuras 7(a) e 7(b) ilustram a perda de espessura em um tubo de trocador de calor tipo bitubular por corrosão-erosão.

**Figura 7** - Corrosão-erosão em trocador de calor tipo bitubular aplicado a produção de polietileno: (a) na parede externa do tubo interno; (b) na parede interna do tubo externo.



Fonte: De autoria própria.

## 2.4 MEDIÇÃO DE ESPESSURAS COM ULTRASSOM

O início dos estudos sobre a física de sinais de ultrassom data do fim do século XVIII, impulsionada primordialmente pela curiosidade do fisiologista italiano Lazzaro Spallanzani, o primeiro a começar os estudos nesse sentido. Ele deduziu que morcegos utilizavam um sistema de transmissão e detecção de eco para navegar através de obstáculos, uma vez que não possuem visão plena (TSUNG, 2015).

Diversos outros estudos comprovaram a utilização de sinais de ultrassom por outros animais vertebrados como forma de comunicação e/ou navegação. Um exemplo é a emissão de sons inaudíveis ao ouvido humano por roedores adultos para o aviso de perigo eminente (NYBY, 1978). Outro exemplo são os golfinhos, que também possuem habilidade de comunicação e localização através de ultrassom.

O ultrassom possui este nome por se tratar de uma forma de energia que possui frequências acima do máximo audível humano, que é verificado em torno de 20 kHz. O escopo de frequências de ultrassom não possui um máximo definido (OLIVEIRA, 2015).

Medir espessuras com ultrassom é uma prática consolidada no âmbito industrial. A sua utilização é simples, os resultados são obtidos de forma rápida e não necessita de grandes aparatos de segurança ou acessórios específicos. Isto viabiliza a utilização também para detecção de descontinuidades, corrosão ou falhas nos mais diversos materiais, seja ele aço, metal não ferroso ou não metal.

### 2.4.1 Princípios básicos

O método de ensaio por ultrassom é baseado na propagação, na reflexão e na difração de um feixe sônico em um meio. Uma onda mecânica se propaga em um material através do movimento de partículas deste meio. Para haver propagação do som, é necessária uma interação

entre as partículas, sendo que o movimento oscilatório destas seja transmitido para sua vizinhança (PINHEIRO, 2022).

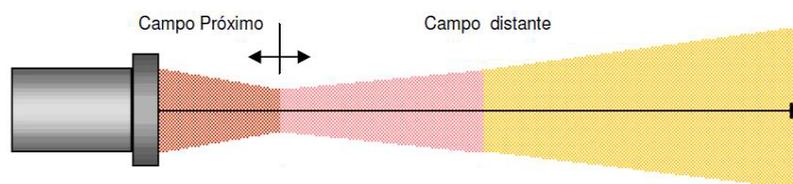
Quando um átomo ou molécula se move de sua posição no retículo cristalino do material em função de uma força externa, as forças interatômicas tentam restabelecer o equilíbrio do meio, sendo assim é gerado um movimento oscilatório. Este movimento ocorre para uma onda ultrassônica, em alta frequência que dentro do espectro sônico pode variar entre  $10^4$  e  $10^9$  Hz (PINHEIRO, 2022).

A onda acústica percorre o meio e perde energia mecânica de forma gradual, o que se chama de atenuação sônica. Esta, ao encontrar uma parede e refletida, pode ser também transmitida a outro meio. Essa reflexão é chamada de eco.

A velocidade de propagação do som em um meio varia de acordo com as propriedades elásticas (módulo de elasticidade e densidade) e a temperatura do material. Sendo assim, medindo-se o tempo entre emissão e recepção da onda, pode-se calcular a distância entre a superfície onde a onda foi produzida e onde ela foi refletida, além de ser possível determinar a posição e tamanho de uma descontinuidade (PINHEIRO, 2022).

Quando um feixe de onda acústica é produzido no interior de um material, ele se divide, formando o campo próximo e o campo distante, conforme ilustra a Figura 8.

**Figura 8** - Classificação das zonas de campo sônico.



Fonte: ANDREUCCI, 2018.

A região de campo próximo caracteriza-se pela ocorrência de interferências construtivas e destrutivas entre as ondas, provocando máximos e mínimos na intensidade do campo acústico. Na região de campo distante, as ondas de ultrassom sofrem somente interferência construtiva, de maneira a formar uma frente de onda quase plana que se atenua à medida que se propaga no meio, distanciando-lhe da fonte. Por ser uma região de interferência, deve-se tomar o cuidado de não ensaiar peças com comprimento inferior ao do campo próximo (GONÇALVES, 2009).

## 2.5 TIPOS DE ONDA

Ondas sonoras são ondas mecânicas, ou seja, correspondem fisicamente à propagação de energia através de materiais. Por isso, velocidade de propagação do som é diferente nos diversos tipos de materiais e varia de acordo com as características destes, tais como densidade, rigidez e organização estrutural (CHEEKE, 2002);

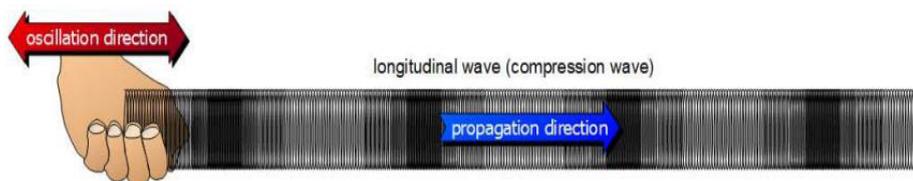
Uma primeira classificação está relacionada aos planos de propagação da onda sonora, e é dependente da rigidez do material (BOLLER, 2009). MARTIN (2012) propôs um modelo simplificado da estrutura de um material utilizando esferas e molas, onde as esferas representam as partículas e as molas, as forças de atração e repulsão entre elas. Considerando os módulos de rigidez elástica e de rigidez ao cisalhamento como a rigidez das molas que unem as partículas do modelo, respectivamente à compressão/tração e rotação é possível entender a relação direta da velocidade de propagação de onda sonora com os módulos de rigidez elástica e de cisalhamento e o coeficiente de Poisson. (BOLLER, 2009).

Um ou mais dos tipos de propagação de ondas sonoras, podem ocorrer simultaneamente em um mesmo material. Uma frente de onda longitudinal, que é mais veloz, pode ser seguida por uma frente de onda transversal, que é mais lenta. Um dos objetivos das técnicas de ultrassom é excitar tipos diferentes de ondas em um material, obtendo-se através do modo de propagação de cada uma delas, conclusões a respeito das características da estrutura e defeitos deste material (CHEEKE, 2002).

Em líquidos e gases, os modos de propagação de onda sonora, que incluem o movimento perpendicular ao sentido de propagação da onda, como em ondas transversais, de flexão e superficiais são atenuados e praticamente inexitem, devido à baixíssima rigidez ao cisalhamento nesses estados (CHEEKE, 2002). Nos materiais sólidos, ou em líquidos com alta viscosidade, a identificação dos diferentes tipos de propagação de ondas sonoras e de seu nível de intensidade pode trazer evidências de defeitos, níveis de dureza e até sentidos de organização e crescimento granular (BROOK, 2012).

### 2.5.1 Ondas longitudinais (ou de compressão)

Uma onda é longitudinal, quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram nas mesmas direções de propagação da onda nesse meio. Neste caso os planos de partículas do meio de propagação não mantêm as mesmas distâncias uns dos outros, conforme mostra a Figura 9.

**Figura 9 - Ondas longitudinais.**

Fonte: <https://www.tec-science.com>

Como a velocidade do som é uma constante do material, a escolha de certa frequência determinará o comprimento da onda ultrassônica. Sendo assim a velocidade de propagação do som de uma onda longitudinal pode ser calculada pela equação 2.1:

$$V_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (2.1)$$

Onde:

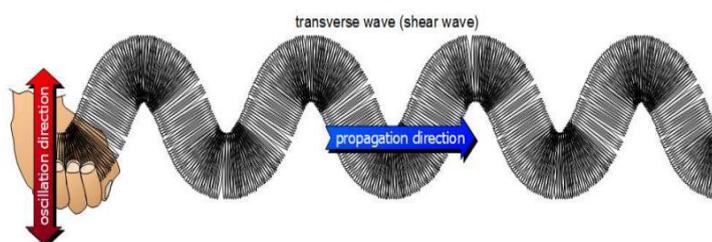
$E$  = módulo de elasticidade de Young ( $\text{N/m}^2$ );

$\mu$  = constante de Poisson;

$\rho$  = densidade do material ( $\text{kg/m}^3$ ).

### 2.5.2 Ondas Transversais

Uma onda é transversal quando as partículas do meio em que ela se propaga, vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda nesse meio. Neste caso, os planos de partículas no meio de propagação mantêm a distância uns dos outros, conforme a Figura 10.

**Figura 10 - Ondas transversais.**

Fonte: <https://www.tec-science.com>.

A velocidade de propagação de uma onda transversal pode ser calculada em função das características físicas de um material conforme a equação 2.2:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade de Young (N/m<sup>2</sup>);

$\mu$  = constante de Poisson;

$\rho$  = densidade do material (kg/m<sup>3</sup>);

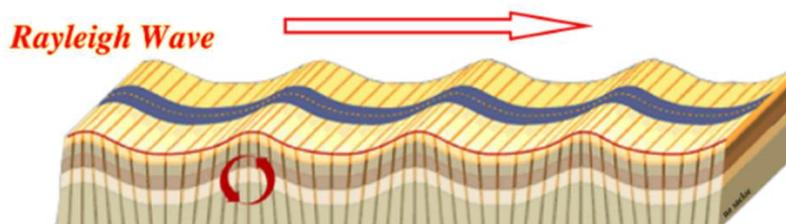
G = módulo de cisalhamento (N/m<sup>2</sup>).

### 2.5.3 Ondas superficiais

As ondas superficiais são assim chamadas, pela característica de se propagar na superfície dos materiais. As ondas superficiais são do tipo secundário (o modo de vibração é uma combinação do modo de vibração longitudinal e transversal), elas são subdivididas em ondas de Raleigh, Love e Lamb.

As ondas de Rayleigh, ou ondas acústicas superficiais (*SAW – Surface Acoustic Wave*), são ondas transversais que tangenciam a superfície do material com profundidade de um comprimento de onda. A direção de propagação de tais ondas é obtida fazendo o ângulo de incidência igual ao segundo ângulo crítico de refração. Tais ondas possuem suas componentes longitudinais e transversais acopladas, apresentando assim a mesma velocidade de propagação (CHEEKE, 2002), conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 - Ondas de Rayleigh.



Fonte: <http://homepage.ufp.pt>.

A velocidade de propagação das ondas de Rayleigh é aproximadamente 10% inferior a velocidade de uma onda transversal, considerando o mesmo material de ensaio, e pode ser calculada pela equação empírica 2.3:

$$V_S \approx \frac{(0,87 + 1,12\mu)}{1 + \mu} \cdot V_T \quad (2.3)$$

Em função dos valores dos coeficientes de Poisson dos materiais, pode-se admitir que a relação entre as velocidades da onda cisalhante (VC) e longitudinal (VL), e da onda superficial de Rayleigh (VS) e cisalhante sejam expressas pelas equações 2.4 e 2.5:

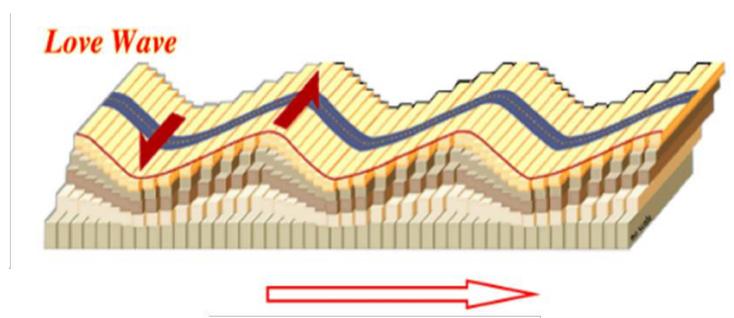
$$VC \cong 0,50VL \quad (2.4)$$

$$VS \cong 0,92 VC \quad (2.5)$$

Assim a velocidade da onda cisalhante é em torno de 50% da velocidade da onda longitudinal e a velocidade da onda superficial de Rayleigh cerca de 92% da onda cisalhante (LAMY, 1990).

As ondas de Love consistem em ondas cisalhantes polarizadas horizontalmente com grande quantidade de energia. Essas ondas descrevem o comportamento sísmológico da Terra durante terremotos (ROSE, 1999). A Figura 12 ilustra estas ondas.

**Figura 12** - Ondas de Love.



Fonte: <http://homepage.ufp.pt>.

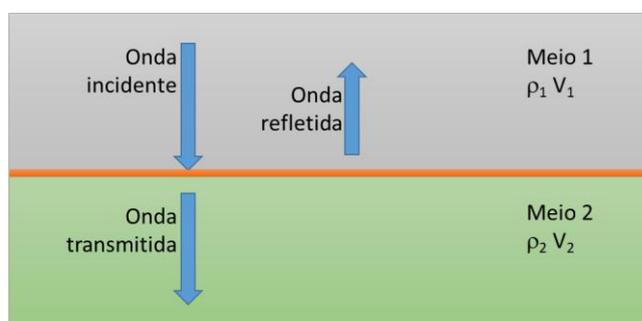
Por fim, as ondas de Lamb correspondem a ondas superficiais em materiais ou meios de espessura com ordem de grandeza inferior, em muitas vezes, em relação ao comprimento da onda. As ondas de Lamb podem subdividir-se em ondas simétricas e assimétricas, o que corresponderia respectivamente às denominações de ondas de flexão e dilatação, propostas por (BOLLER, 2009).

## 2.6 INCIDÊNCIA DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS EM DIFERENTES MEIOS DE PROPAGAÇÃO

Quando ondas ultrassônicas longitudinais se propagando em um meio “1”, incidem perpendicularmente em uma interface de mudança para o meio “2”, algumas relações matemáticas são válidas. Um mesmo meio pode ter várias interfaces, sendo desta forma chamado de meio descontínuo.

Quando a onda-sônica passa de um meio 1 para um meio 2, apenas uma característica fica constante: a frequência. A Figura 13 mostra o conceito de onda incidente e refletida em diferentes meios.

**Figura 13** - Ondas incidentes e refletidas em diferentes meios.



Fonte: De autoria própria.

As características acústicas do meio 1 são  $\rho_1 v_1$ , onde  $\rho_1$  é a densidade do meio 1 e  $v_1$  a velocidade da onda neste meio; de modo análogo, as características do meio 2 são  $\rho_2$  e  $v_2$ . Algumas relações matemáticas podem ser obtidas entre as amplitudes das ondas refletidas e transmitidas, e a amplitude da onda incidente. Considerando “A” como amplitude da onda incidente, “B” como amplitude da onda refletida e “C” como amplitude da onda transmitida, as amplitudes “B” e “C” podem ser escritas em função de “A”, conforme equações 2.6 e 2.7 respectivamente (RODRIGUES ET AL., 2000):

$$B = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} A \quad (2.6)$$

$$C = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} A \quad (2.7)$$

As equações 2.6 e 2.7 foram estabelecidas em função das amplitudes das ondas ultrassônicas no meio. A condição de maior interesse no emprego do ultrassom é aquela em que

a amplitude da onda transmitida de um meio 1 para um meio 2 é máxima, condição em que a amplitude da onda refletida é mínima. Nesta condição a potência transmitida é máxima e, em uma situação ideal, a amplitude da onda refletida deve ser igual a zero ( $B = 0$ ). Logo, pode-se obter a equação 2.8.

$$0 = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} A \text{ logo, } \rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad (2.8)$$

A quantidade de energia refletida ou transmitida por uma onda é definida como impedância acústica ( $Z$ ), que é igual ao produto das duas características acústicas: a densidade do meio e a velocidade de propagação da onda, conforme a equação 2.9.

$$Z = \rho V \quad (3.9)$$

As impedâncias acústicas permitem calcular as taxas de reflexão ( $R$ ) e de transmissão ( $T$ ) de uma onda, conforme as equações 2.10 e 2.11 (RODRIGUES ET AL., 2000).

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.10)$$

$$T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.11)$$

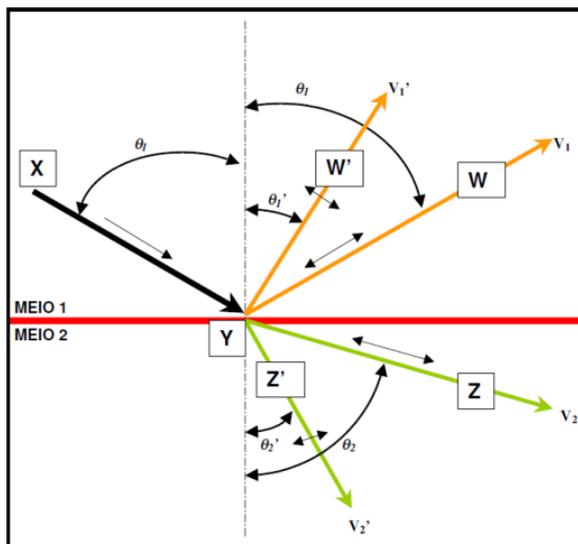
## 2.7 LEI DE SNELL

Um dos mais importantes tópicos associados à medição por ultrassom são os fenômenos associados às leis de reflexão. A velocidade de uma onda refratada depende da velocidade no meio e do ângulo de incidência da onda no meio. Quando uma onda ultrassônica incide obliquamente sobre uma superfície plana que separa dois meios, com um ângulo de incidência  $i$ , surgem ondas refletidas e transmitidas.

Os ângulos de refração e reflexão dependem do ângulo de incidência e da velocidade da onda ultrassônica nos materiais. Com a incidência oblíqua da onda ocorre o fenômeno da conversão de modo, que consiste na alteração do seu modo de propagação, como por exemplo, as ondas longitudinais em transversais e vice-versa (FACCINI, 1997).

A Figura 14 mostra uma onda longitudinal ( $XY$ ) incidindo obliquamente na interface entre o meio 1 e o meio 2, segundo a direção  $XY$ . A onda longitudinal é refletida e refratada segundo as direções  $YW$  e  $YZ$ , respectivamente, para os meios 1 e 2. A incidência oblíqua da onda  $XY$  origina duas outras ondas transversais, que se propagam segundo as direções  $YW'$  e  $YZ'$ , em 1 e 2. Este fenômeno ocorre, nas bordas ou interface dos dois meios.

Figura 14 - Ondas refratadas e refletidas nos meios 1 e 2.



Fonte: MINICUCCI, 2003.

Onde:

V1 – Velocidade de propagação da onda longitudinal refletida no meio 1 (YW);

V2 – Velocidade de propagação da onda longitudinal refratada no meio 2 (YZ);

V1' – Velocidade de propagação da onda transversal refletida no meio 1 (YW');

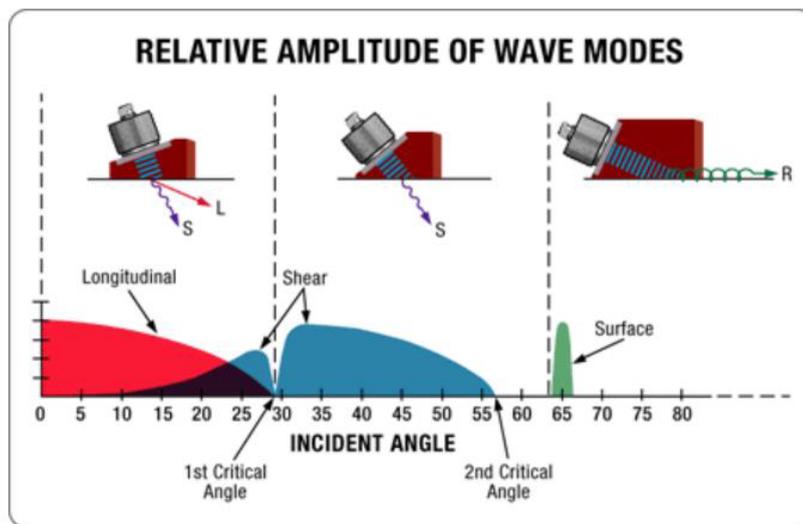
V2' – Velocidade de propagação da onda transversal refratada no meio 2 (YZ').

A Lei de Snell é muito usada na área de acústica, pois relaciona as velocidades com os ângulos de incidência, refração e reflexão das ondas. Esta relação é fundamental no estudo das ondas superficiais, que requerem um cálculo preciso do ângulo de incidência para serem geradas na superfície da peça. A equação 2.12 apresenta esta relação.

$$\frac{V_1}{\text{sen } \theta_1} = \frac{V_2}{\text{sen } \theta_2} = \frac{V_2'}{\text{sen } \theta_2'} = \frac{V_1'}{\text{sen } \theta_1'} \quad (2.12)$$

A Figura 15 ilustra o gráfico do tipo de onda em função do ângulo de incidência. Para o aço, a maior intensidade de sinal é obtida com o ângulo de zero grau, enquanto para a onda transversal esse valor é de trinta graus.

**Figura 15** - Tipo de onda e intensidade em função do ângulo de incidência.



Fonte: [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com)

## 2.8 EQUIPAMENTOS DE ULTRASSOM

O equipamento de ultrassom é constituído basicamente das seguintes partes:

- Gerador de pulsos, que é uma unidade pulsadora/receptora ultrassônica responsável pela excitação do transdutor;
- Amplificador de sinais, responsável pela captação da onda que retorna do material;
- Osciloscópio ou tela, que permite visualizar a forma de onda de um sinal elétrico e principalmente analisar determinados parâmetros deste sinal;
- Fonte de alimentação e portas de entrada/saída para conexão com outros instrumentos.

## 2.9 GANHO

O ganho é um valor adimensional da medida da ampliação do sinal adquirido no ensaio. A variação do ganho serve para compensar a atenuação sônica e pode, portanto, ser utilizado na análise de propriedades em materiais como uma grandeza diretamente proporcional à atenuação. O ajuste de ganho é feito para regular a altura dos picos que representam os ecos com relação às linhas marcadas no visor da aparelhagem (FONSECA, 2005).

## 2.10 TRANSDUTORES

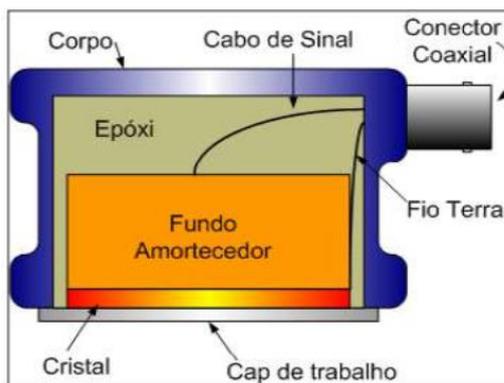
Transdutores são dispositivos capazes de converter uma forma de energia em outra. Na maioria dos casos, eles convertem energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa (AGUIRRE, 2013). Esse tipo de dispositivo é diferente de um sensor, que é capaz de detectar uma grandeza, mas não a converte em outro tipo de energia.

Os transdutores podem ser classificados em dois grupos: ativos e passivos. Um componente cuja energia de saída é fornecida pelo seu sinal de entrada é comumente chamado de transdutor passivo (DOEBELIN, 1990). De uma forma mais simples, são aqueles que geram um sinal elétrico em resposta a um estímulo. Um transdutor ativo, no entanto, tem uma fonte auxiliar de energia que fornece uma parte importante da potência de saída (DOEBELIN, 1990). São equipamentos que necessitam de uma fonte externa para operar.

Os transdutores também podem ser classificados como simples ou compostos. O transdutor simples é caracterizado por possuir apenas um estágio de transdução entre entrada e saída (AGUIRRE, 2013). Existem quatro tipos mais usuais de transdutores: Reto ou normal, angular, duplo-cristal e o phased-array.

### 2.10.1 Reto ou normal

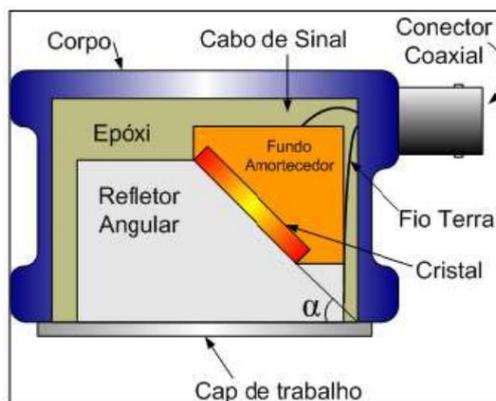
Esse tipo de transdutor trabalha com apenas um cristal. Eles emitem ondas ultrassônicas de feixe reto no material de análise. Ao encontrar uma interface com impedância acústica diferente, uma parte da energia das ondas é refletida, gerando um sinal de eco. Esse eco é recebido pelo transdutor, que converte essa onda mecânica num sinal elétrico, que passa a ser analisado com o auxílio de um sistema de aquisição e processamento de sinais. A face de contato do transdutor com a peça deve ser protegida contra desgastes mecânicos, podendo utilizar membranas de borracha finas e resistentes ou camadas fixas de epóxi enriquecido com óxido de alumínio (ANDREUCCI, 2018). A Figura 16 ilustra a composição desse tipo de transdutor.

**Figura 16 - Transdutor reto.**

Fonte: [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com).

### 2.10.2 Angular

A diferença entre transdutores do tipo reto e transdutores angulares é que o cristal da angular forma um determinado ângulo com a superfície analisada. O ângulo é obtido, inserindo uma cunha entre o cristal piezelétrico e a superfície. A cunha pode ser fixa, sendo então englobada pela carcaça ou intercambiável (ANDREUCCI, 2018). A Figura 17 ilustra a composição desse tipo de transdutor.

**Figura 17 - Transdutor angular.**

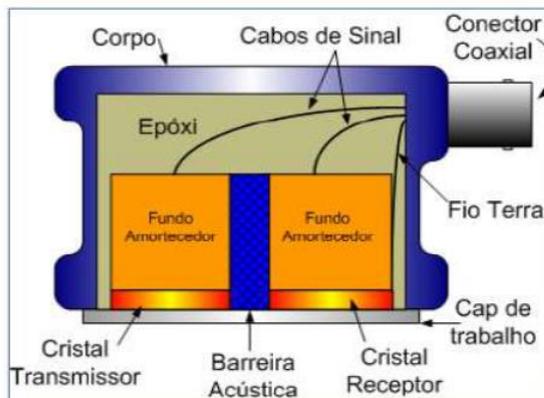
Fonte: [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com).

### 2.10.3 Duplo-cristal

Os transdutores duplo-cristal, também chamados de transdutores duplo-elemento, utilizam dois cristais, um como emissor e outro como receptor e possuem um isolante acústico entre eles. Qualquer um dos dois cristais pode trabalhar como emissor ou receptor. Esse tipo de

transdutor costuma ser utilizado nos procedimentos de medição de espessura por ultrassom (ANDREUCCI, 2018). A Figura 18 ilustra a composição desse tipo de transdutor.

**Figura 18** - Transdutor duplo cristal.

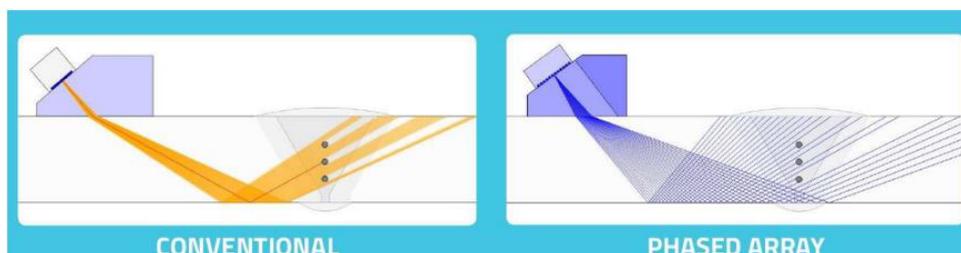


Fonte: [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com).

#### 2.10.4 Phased-array

O transdutor *phased-array* possui vários elementos em uma mesma estrutura como se houvesse vários transdutores retos um do lado do outro. A Figura 19 ilustra a comparação entre um transdutor convencional e um transdutor *phased-array*. Esses elementos podem ser pulsados separadamente ou controlados por um circuito programado. Em um mesmo transdutor desse tipo podem operar (ANDREUCCI, 2018), e a frequência de trabalho da maioria dos transdutores *array* varia entre 2 MHz e 20 MHz.

**Figura 19** - Transdutor phased-array



Fonte: <https://www.acuren.com>.

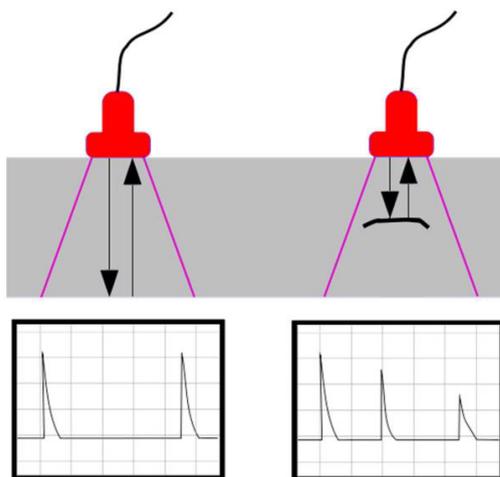
## 2.11 APARELHOS UTILIZADOS NA INSPEÇÃO POR ULTRASSOM NA FORMA A-SCAN

A inspeção por ultrassom na forma A-scan transmite o pulso e o recebe na forma de eco, por meio de uma única linha. Dessa forma, apenas um elemento transdutor é utilizado.

No sinal percebido pelo elemento piezoelétrico com a informação dos ecos recebidos, o eixo horizontal corresponde à profundidade da interface que gerou determinado eco (representado como pico) e o eixo vertical corresponde à amplitude do eco recebido, que depende dos coeficientes de reflexão da interface e de atenuação do meio.

Vale destacar que somente é possível visualizar o eixo horizontal como profundidade caso a velocidade de propagação do som no meio em questão seja conhecida, caso contrário o eixo horizontal trata-se do tempo (FANET, 2014). A Figura 20 ilustra a representação de um sinal ultrassônico na forma A-scan.

**Figura 20** - Representação gráfica A-scan.



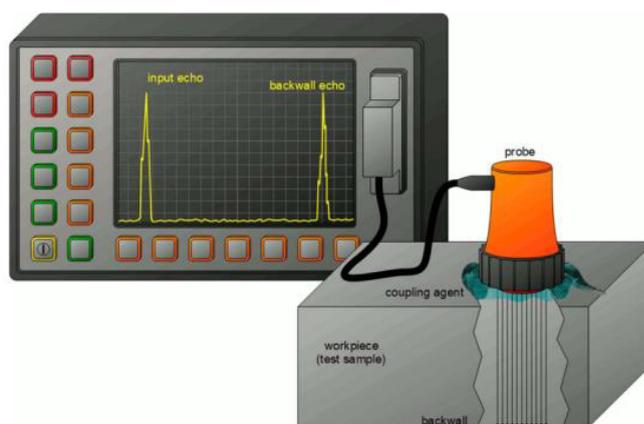
Fonte: <http://www.wermac.org>.

## 2.12 MÉTODO DE INSPEÇÃO PULSO ECO

A técnica ultrassônica pulso-eco é a mais largamente utilizada devida principalmente a sua simplicidade e eficiência. Esta técnica envolve a detecção de ecos produzidos pela reflexão, do pulso ultrassônico, em uma descontinuidade presente no material ou pela interface do corpo de prova. É utilizado apenas um transdutor para emitir o pulso ultrassônico (emissor) e receber o eco refletido (receptor). Quando o pulso emitido encontra uma superfície refletora, parte ou toda a energia é refletida, retornando ao transdutor. A porcentagem de energia que é refletida é diretamente dependente do tamanho da superfície refletora em relação ao tamanho do feixe ultrassônico incidente. A direção do feixe refletido (eco) depende da orientação da superfície

refletora em relação ao feixe incidente. A energia refletida é avaliada tanto pela quantidade de energia refletida em uma determinada direção quanto pelo tempo decorrido entre a transmissão do pulso inicial e a recepção do eco, como mostrado na Figura 21 (DA COSTA VEIGA et. Al., 2003).

**Figura 21** - Método pulso-eco.



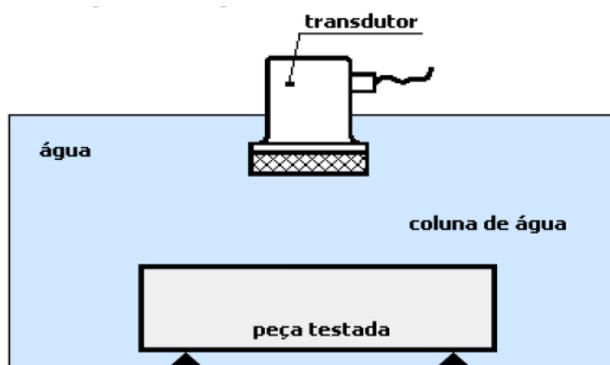
Fonte: <https://www.rankred.com>.

Uma das vantagens desta técnica é a grande sensibilidade para detecção de pequenas discontinuidades presentes no material, além de detectar com precisão discontinuidades logo abaixo da superfície de entrada do feixe sônico (SANTIN, 1996).

### **2.13 MÉTODO DE INSPEÇÃO POR IMERSÃO**

No ensaio ultrassônico por imersão, conforme ilustrado na Figura 22, o corpo de prova e o transdutor responsável pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas ficam imersos em um fluido de ensaio, geralmente água, que realiza a função de acoplamento. Dessa forma, não há contato entre o transdutor e o corpo de prova, que são separados por uma distância padronizada, comumente denotada por coluna d'água (LEITE, 2012).

**Figura 22** - Inspeção por ultrassom por imersão.

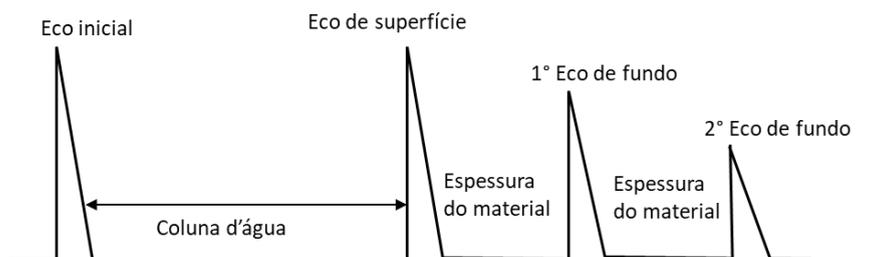


Fonte: FONSECA, 2005.

Dentre as vantagens do método de inspeção por imersão, encontram-se principalmente o aumento da velocidade de inspeção, a possibilidade de controle do feixe sônico, pois afasta o campo próximo, campo de maior ruído da região de inspeção, desta forma facilitando a detecção de descontinuidades superficiais; a uniformidade do acoplamento, melhorando a transmissão da energia sônica para o corpo de prova quando comparado a outros métodos, nos quais o transdutor fica em contato direto com superfície da peça, e a possibilidade de adequar o método a um dispositivo de automação (SANTIN, 2003).

A Figura 23 ilustra o comportamento da onda sônica durante a inspeção com uma peça submersa. Neste tipo de ensaio ultrassônico, um pulso elétrico é convertido em onda sonora, que neste momento aparece na tela do aparelho de ultrassom como o eco inicial. Esse pulso é propagado através da água até atingir a face do corpo de prova. Neste ponto, uma parte do pulso é refletida de volta ao transdutor, aparecendo como o eco de superfície e evidenciando o tempo de trajeto da onda. A outra parte é transmitida ao corpo de prova, e é refletida de volta ao transdutor ao se propagar até o final dele, aparecendo na tela como o primeiro eco de fundo. Sucessivos ecos de fundo tendem a retornar ao transdutor com amplitudes cada vez menores, que compreende a região fora de interesse. Caso apresente uma descontinuidade em determinada região do corpo de prova, um eco de descontinuidade costuma se apresentar entre o eco de superfície e o primeiro eco de fundo (LEITE, 2012).

**Figura 23** - Comportamento do sinal da onda sônica na inspeção por imersão em configuração pulso-eco.



Fonte: RIBEIRO, 2009.

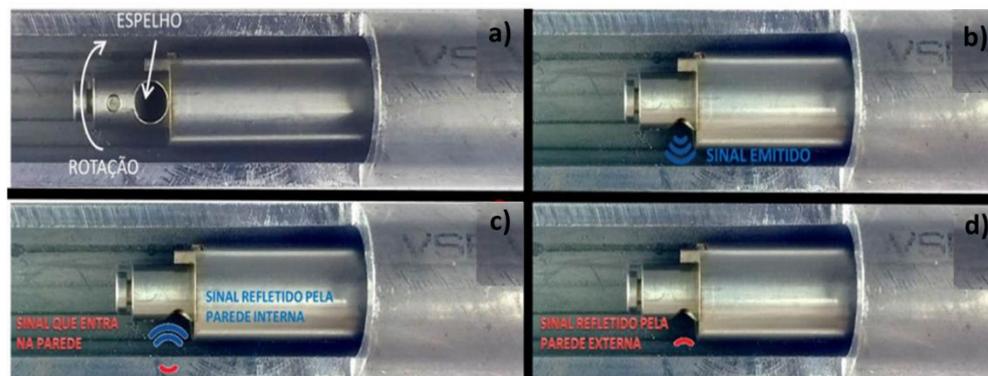
## 2.14 ENSAIO DE ULTRASSOM IRIS - INTERNAL ROTARY INSPECTION SYSTEM

O ensaio de Ultrassom IRIS já é utilizado há alguns anos no mundo e, no Brasil, é uma das principais técnicas para inspeção de trocadores de calor, juntamente com as Correntes Parasitas.

O IRIS se baseia no ensaio de ultrassom por imersão, no qual se utiliza uma coluna d'água para transmitir o sinal ultrassônico até a peça a ser inspecionada. Mas neste caso, um sistema de rotação integrado, movido pelo próprio fluxo de água bombeado para dentro do tubo, gira um espelho acústico que reflete o pulso ultrassônico conforme Figura 24 (a), inicialmente emitido paralelamente ao eixo axial do tubo, perpendicularmente à parede interna do tubo, direcionando-o assim em torno da circunferência da parede do tubo, como mostrado na Figura 22(b), ORNELAS (2017).

O sinal é então refletido pelas paredes interna e externa do tubo, como ilustra as Figuras 24(c) e (d) respectivamente, o que resulta após processamento pelo software da técnica, em indicações de amplitude e tempo de propagação do som, o que permite determinar os diâmetros interna e externo do tubo e, assim, a espessura de sua parede, além de possíveis discontinuidades entre estas duas dimensões. É justamente a dinâmica de funcionamento, derivada do mecanismo de rotação, que dá nome ao ensaio. Conforme a sonda é puxada ao longo do tubo, o movimento giratório do espelho resulta em um percurso de varredura helicoidal, possibilitando o escaneamento completo do tubo (ORNELAS, 2017).

**Figura 24** - (a). Sonda IRIS no interior de um tubo. (b) Propagação da onda pelo interior do tubo, (c) Transmissão da onda para a parede do tubo, (d) Onda refletida com informação da espessura de parede.



Fonte: ORNELAS, 2023.

## 2.15 ATENUAÇÃO DA ONDA

A onda acústica, ao percorrer um material qualquer, sofre diversos efeitos em sua trajetória, tais como: dispersão, espalhamento e absorção. Em meios homogêneos e pouco espalhadores, a absorção é o principal mecanismo de degradação da amplitude do pulso acústico. A absorção é caracterizada pela transferência de energia da onda para cada partícula do meio.

Por sua vez, o meio responde executando movimento de oscilação e assim transmitindo a vibração às outras partículas dele. Se a frequência aumenta, as moléculas se movem rapidamente gerando dissipação de energia na forma de calor causado pela fricção do movimento entre as camadas moleculares (viscosidade). Com isso, têm menos tempo para recuperar seu estado de equilíbrio durante o processo de relaxação. As moléculas permanecem em movimento, e mais energia é necessária para parar e redirecioná-las novamente, produzindo assim absorção, (VIEIRA, 2005).

A energia do feixe sônico recebido por um transdutor é consideravelmente menor que a intensidade inicial de transmissão (SANTIN, 2003). Segundo MARTIN (2012) e SANTIN (2003), isso ocorre principalmente por dois efeitos, o primeiro deles é a própria característica geométrica de propagação do feixe que proporciona a dispersão do mesmo. O segundo efeito da atenuação, se dá basicamente pela diferença de impedâncias acústicas entre interfaces, absorção e espalhamento das ondas ultrassônicas, além das perdas devido ao efeito da difração.

A primeira forma de atenuação trata-se da reflexão sofrida pelo feixe ultrassônico devido à diferença de impedâncias acústicas quando ele atravessa uma interface entre duas substâncias diferentes. O segundo tipo de atenuação é conhecido por absorção e ocorre basicamente pela conversão da energia mecânica em energia térmica (SANTIN, 2003).

Quando uma onda ultrassônica se propaga agitando as partículas de um material, tais partículas colidem com partículas adjacentes tornando assim possível a conversão na energia mecânica da onda em calor no material. A absorção aumenta de maneira proporcional à frequência (MARTIN, 2012).

A terceira causa de atenuação é o espalhamento da onda ultrassônica que ocorre quando um feixe sônico atinge descontinuidades cristalinas, tais como os contornos de grão e inclusões não metálicas, estas descontinuidades tendem a desviar pequenas quantidades de energia para fora do feixe principal. Quando o tamanho de grão é muito menor que um comprimento de onda, o efeito de espalhamento pode ser desprezado, porém para tamanhos de grão acima de 10% do comprimento de onda, o espalhamento pode prejudicar a confiabilidade do teste (SANTIN, 2003).

## **2.16 NORMA REGULAMENTADORA 13**

No dia 08 de junho de 1978 foi publicada a norma regulamentadora NR-13 que tratava das atividades de Caldeira e Vaso sob Pressão, sendo contemplados os itens de instalação, operação, manutenção e inspeção destes equipamentos. Desde seu surgimento houve atualizações e alterações nos anos 1983, 1984, 1994, 2008 e 2014 (PORTAL DO MTE, 2014).

A NR 13 estabelece os requisitos mínimos para integridade estrutural de caldeiras, vasos de pressão e tubulações também reporta a responsabilidade do empregador no cumprimento da norma; refere-se como edificar um vaso de pressão cujo produto de  $P \times V$  superior a oito, onde  $P$  é a pressão máxima de operação em kPa e  $V$  o seu volume interno em  $m^3$ , considera-se também o gás e fluido transportado ou armazenado.

A NR 13 também descreve equipamentos como recipientes transportáveis, vasos de pressão destinados ao transporte de produtos, reservatórios portáteis de fluido comprimido e extintores de incêndio, dutos, fornos e serpentinas para troca térmicas, vasos que fazem parte de máquinas de fluido rotativo ou alternativo, vasos de pressão com diâmetro inferior a 150 mm para fluidos B, C e D. Trocadores de calor por placas corrugadas gaxetadas, geradores de vapor não enquadrados no código de vasos de pressão. Tubulação de rede pública e distribuição de água e gás e de coleta de esgoto como tubos de instrumentação devem ser submetidos às inspeções em códigos e normas nacionais ou internacionais (PORTAL DO MTE, 2014).

A NR-13 determina que todo vaso de pressão precisemos passar por inspeção de segurança inicial, periódica e extraordinária, e deve contemplar nestas inspeções o exame externo, interno e teste hidrostático, aprovado por um profissional habilitado.

Entende-se por profissional habilitado, aquele que tem competência legal para exercício da profissão nas atividades referentes ao projeto de construção, acompanhamento operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras e vasos de pressão, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no país. (PORTAL DO MTE, 2014).

Para os prazos de inspeção periódica dos vasos, deve-se obedecer ao limite máximo estabelecido pela NR-13 no qual traz a categoria, exame externo e exame interno.

## **2.17 INSPEÇÃO DE TROCADORES DE CALOR DE SUPER ALTA PRESSÃO APLICADOS A PRODUÇÃO DE POLIETILENO**

Seguindo a NR 13, do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil, que tem como objetivo, condicionar inspeção de segurança e operação de vasos de pressão, caldeiras, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, estes trocadores são classificados como categoria 1 e precisam de inspeções a cada 3 anos.

O processo de inspeção destes trocadores tem como objetivo, estimar a integridade do equipamento a partir da medição de espessura do tubo externo e interno. Para o tubo interno, atualmente são aplicadas três técnicas:

### **a) Medição de espessura por ultrassom a partir de uma janela de inspeção**

Neste método uma janela de visita é aberta em apenas um dos tubos externo do trocador para expor o tubo interno. Para fazer a inspeção é feita uma limpeza mecânica e então a parede do tubo interno é medido com um aparelho de medição de espessura por ultrassom. A Figura 25 ilustra a abertura de uma janela de inspeção e a Figura 26 um trocador já projetado com a janela de inspeção.

**Figura 25** - Abertura de janela no trocador bitubular de SHP.



Fonte: De autoria própria.

**Figura 26** - Janela de inspeção projetada em trocador de calor de SHP.



Fonte: De autoria própria.

Apesar de simples, esta técnica tem uma limitação importante: apenas um ponto em um dos passes do trocador é medido, sendo o valor obtido para a espessura da parede adotado para todo o trocador de calor. Alguns trocadores possuem até cem passes, e estimar a espessura mínima a partir de apenas um ponto, historicamente tem levado a falhas não previstas.

#### **b) Inspeção por ultrassom com desmontagem total do trocador**

Neste método o trocador é removido de sua base e todos os passes são desmontados, a seguir o tubo interno é removido do tubo externo. Uma vez removido o tubo interno, é realizada uma limpeza e a espessura é medida com utilização de um aparelho de medição de espessura por ultrassom. A Figura 27, posições (a) e (b), ilustram o tubo externo e o tubo interno removido para inspeção.

**Figura 27** - Tubos externos (a) e internos (b).



Fonte: De autoria própria.

Este tipo de inspeção é a mais dispendiosa, consumindo grande quantidade de recursos humanos e materiais. Além disto, é necessário um grande período de interrupção de produção.

**c) Inspeção por *IRIS (Internal Rotary Inspection System)***

Neste tipo de inspeção, é necessária a remoção de todas as curvas do trocador de calor, conforme mostra a Figura 28, realização de hidrojato criterioso de alta pressão e em seguida realização dos ensaios nos tubos.

**Figura 28** - Curvas desmontadas para inspeção por IRIS.



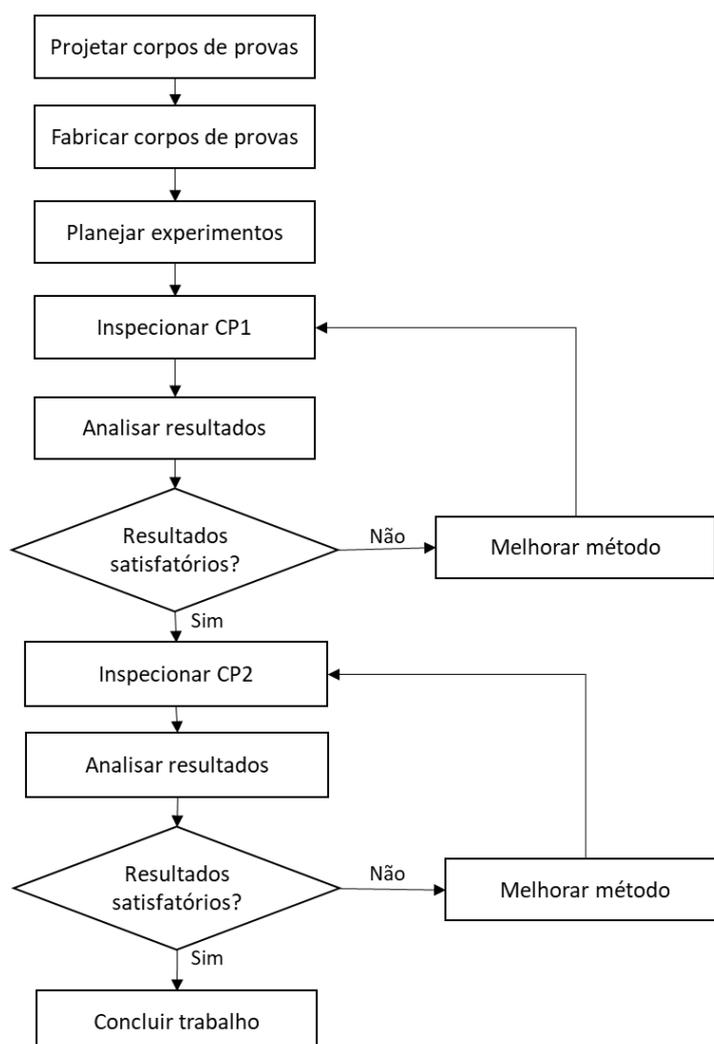
Fonte: De autoria própria.

Este método não tem se mostrado eficaz devido à grande dificuldade de limpeza e remoção de resina polimérica dos tubos internos do trocador o que influencia de forma crucial a qualidade do ensaio. Além disto, é uma inspeção dispendiosa e que demanda uma grande quantidade de recursos humanos e materiais.

### CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

A fim de reproduzir as condições de projeto e operação para um trocador de calor bitubular de super alta pressão em uma indústria petroquímica, e poder medir a espessura utilizando ultrassom na forma A-scan, do tubo interno, a estratégia será fabricar dois corpos de prova. O primeiro corpo de prova será projetado e fabricado com todas as medidas conhecidas, no intuito de validar se o método proposto realmente poderá ser aplicado. Uma vez validado o método, um segundo corpo de prova será fabricado, desta vez com um tubo de processo retirado de um trocador com 15 anos de operação, a fim de verificar se os resultados obtidos no primeiro corpo de prova poderão ser também obtidos em uma situação real. A Figura 29 ilustra o fluxo de trabalho planejado.

**Figura 29** - Fluxo de trabalho planejado para os experimentos.



Sendo assim, a seguir apresenta-se o desenvolvimento da metodologia, baseado no planejamento realizado.

### 3.1 PROJETO DOS CORPOS DE PROVA

O projeto dos corpos de prova tem como objetivo determinar como fabricar as peças visando reproduzir uma inspeção de campo em um trocador bitubular, utilizando para isto uma similaridade com o equipamento em questão. Todos os materiais e dimensões possíveis serão determinados a partir das informações do projeto real do trocador de calor a ser simulado.

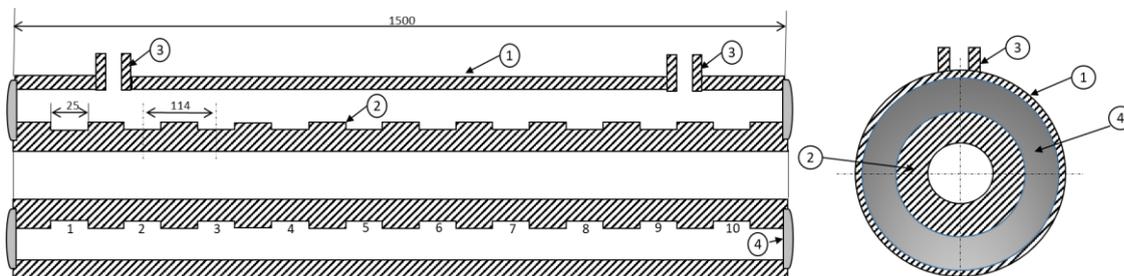
### 3.2 PROJETO DE CP1

Projeteu-se que este corpo de prova será constituído por um tubo interno de aço médio carbono e baixa liga AISI 4340 VAR, com diâmetro interno de 1 ¼” Schedule XXS. Para simular o desgaste, serão projetados dez rebaiços, em sequência e com a mesma distância um do outro, conforme ilustra a Figura 28. A Tabela 4 apresenta a profundidade de cada rebaixo feito neste tubo. Já, o tubo externo, será produzido em aço carbono ASTM A106, sem rebaiços. Após a montagem, alinhamento e concentricidade, o espaço entre os tubos será selado com eletrodo E 7018. Esta configuração de montagem é apresentada na Tabela 5.

**Tabela 4** - Dimensões dos rebaiços em CP1.

Dimensões										
Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rebaixo	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm	11 mm

**Figura 30** - Projeto de Corpo de prova 1.



**Tabela 5** - Itens de CP1.

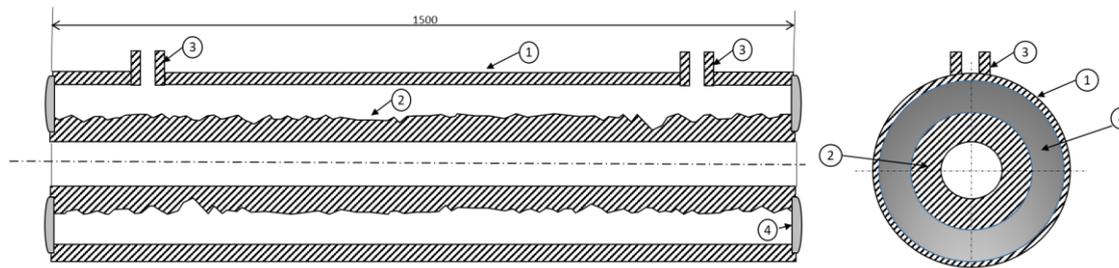
Posição	Descrição	Material
1	Tubo externo	<i>ASTM A 106</i>
2	Tubo interno em AISI 4340	<i>AISI 4340 VAD</i>
3	Vent	<i>ASTM A 106</i>
4	Solda de fechamento	E 7018

### 3.3 PROJETO DE CP2

O Corpo de prova CP2 será constituído por um tubo interno de aço *AISI 4340 VAD* de 1 3/4" *Schedule XXS*, retirado de operação após 15 anos, conforme mostra a Figura 31. Este tubo, em função da erosão corrosão que ocorreu durante os anos de operação, apresenta alvéolos ao longo de todo o seu comprimento. O Tubo externo é em aço carbono *ASTM A106*, novo e sem rebaixas. A Figura 32 e a Tabela 6 apresentam os detalhes para esta configuração de CP2.

**Figura 31** - Tubo interno de CP2.

**Figura 32 - Projeto do Corpo de prova 2.**



**Tabela 6 - Itens de CP2.**

Posição	Descrição	Material
1	Tubo externo	<i>ASTM A 106</i>
2	Tubo interno em AISI 4340	<i>AISI 4340 VAD</i>
3	<i>Vent</i>	<i>ASTM A 106</i>
4	Solda de fechamento	E 7018

### 3.4 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

#### 3.4.1 Fabricação de CP1

O processo de fabricação de CP1 iniciou-se com a colocação do tubo interno no torno, e a partir disto foram feitos dez rebaixas sucessivos, conforme determinado na Tabela 1. A Figura 33 mostra o tubo interno com os rebaixas executados. Depois foi feita a inspeção inicial do tubo, para confirmar o diâmetro interno em cada rebaixo, conforme ilustra a Figura 34.

**Figura 33 - Rebaixos do tubo interno**



**Figura 34 - Medição de espessura em CP1**



Para a medição de espessura foi utilizado um medidor de espessura da marca GE, modelo DM4 DL e um transdutor da marca GE, modelo DA 301, de 5 MHz, ilustrados na Figura 35. Estes instrumentos são medidores de espessura leves, compacto e fácil de usar. Eles são adequados para realizar a medição da espessura de parede e espessura restante da parede, especialmente em componentes ou peças que são suscetíveis à corrosão e erosão (tubos, vasos de pressão etc.). A grande vantagem que se tem com esses equipamentos é que o objeto a ser inspecionado só precisa ser acessível apenas de um lado.

**Figura 35 - Medidor de espessura DM4 DL e transdutor DA 301.**



Antes de realizar as medições de espessura, o equipamento foi calibrado, conforme procedimento abaixo:

- 1) Ajustou-se a velocidade do som para o material a ser medido, conforme instruções do aparelho. No caso deste experimento, utilizou-se a velocidade de propagação para Aço Baixa Liga - 5940 m/s;

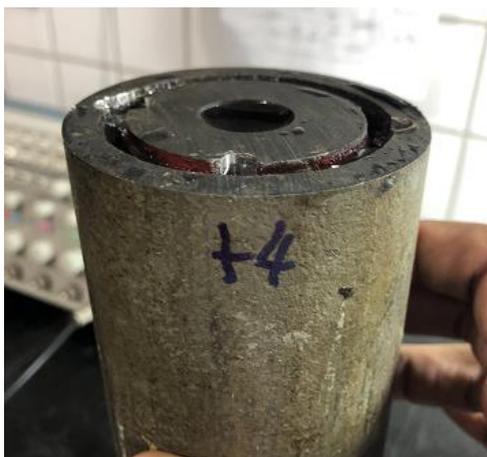
- 2) Selecionou-se o bloco de calibração de modo que a faixa de espessura calibrada (espessura de calibração + ou menos 25%) englobe as espessuras a serem medidas;
- 3) Acoplou-se o cabeçote sobre o bloco de calibração com acoplante Sonotech Ultragel II<sup>®</sup>;
- 4) Leu-se a medida após a espera de alguns segundos para a estabilização da leitura;
- 5) Repetiu-se três vezes as etapas 2 e 3 para confirmar a correta calibração, e repetiu-se uma vez a etapa 4.

A Figura 36 apresenta a realização do procedimento de calibração.

**Figura 36** - Calibração do equipamento com bloco padrão.



Após a calibração do equipamento e medição das espessuras, foi feita a montagem do corpo de prova, iniciando pela inserção do tubo interno no tubo externo. Depois eles foram alinhados e centralizados com o uso de um centralizador, conforme mostra a Figura 37. Para finalizar, foi feita uma solda de selagem nas extremidades.

**Figura 37 - Tubos centralizados**

### 3.4.2 Fabricação de CP2

O processo de fabricação de CP2 iniciou-se com a limpeza e jateamento do tubo, removendo incrustações oriundas dos anos de operação. Para criar referências de posição, foram feitas 6 marcações em cada face do tubo interno, defasados em 60°, determinando assim 6 geratrizes sequenciadas de A a F na primeira face e A' a F' na segunda face. Foram ligados A a A', B a B' e assim sucessivamente, até se ter as linhas longitudinais paralelas, que servirão como referência para os ensaios, a Figura 38 ilustra essa configuração. Depois disto, foram determinados 20 pontos em cada linha, espaçados de 100 mm, onde foram feitas as medições de espessura por ultrassom utilizando o mesmo equipamento que para CP1, conforme mostra a Figura 39. As medidas foram todas anotadas, para posterior validação do método.

**Figura 38 - Geratrizes puncionadas e linhas longitudinais traçadas.**

**Figura 39** - Medição de espessura inicial para tubo interno de CP2.



Após as medições, o corpo de prova foi montado seguindo o mesmo procedimento de CP1.

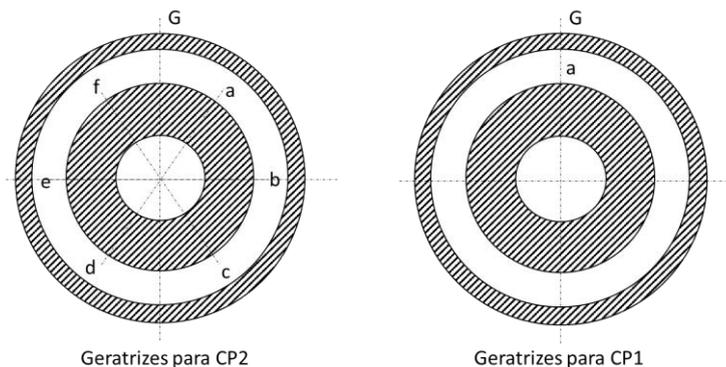
### **3.5 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS PARA CAPTAÇÃO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS NA FORMA A-SCAN.**

Como premissa para sucesso da metodologia, os experimentos de coleta de sinais ultrassônicos na forma A-scan precisavam ser feitos utilizando as mesmas referências utilizadas durante o processo de fabricação, ou seja, para CP1 as medições estão em função da posição e da profundidade do rebaixo, assim como para CP2 as medições precisam ser feitas sobre as linhas das geratrizes do tubo interno com o mesmo espaçamento de 100mm, conforme ilustra a Tabela 7 e a Figura 40.

**Tabela 7** - Planejamento dos ensaios.

Quantidade de sinais por corpo de prova				
Corpo	Rebaixos	Pontos longitudinais	Geratrizes	Número de sinais a coletar
CP1	10	-	1	10
CP2	-	20	6	120
Total				130

**Figura 40** - Geratrizes dos tubos e dos corpos de prova.



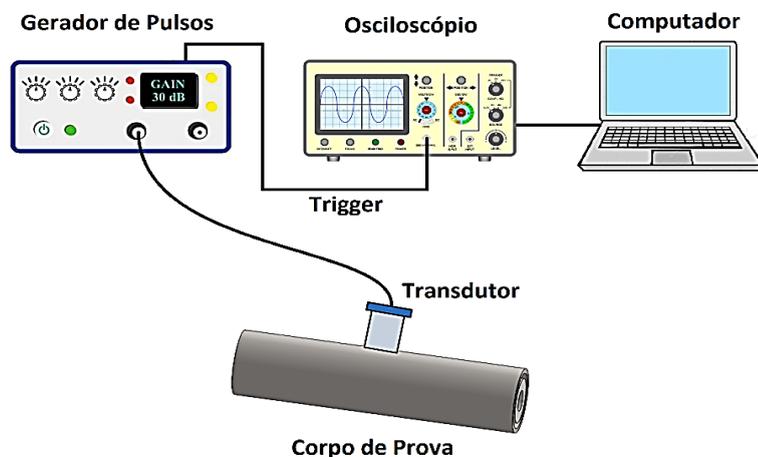
### 3.6 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS UTILIZANDO ULTRASSOM EM CP1 E CP2

#### 3.6.1 Configuração experimental da medição por ultrassom A-scan

Para os ensaios de ultrassom, foi utilizada a configuração apresentada na Figura 41 (a), com os seguintes equipamentos – Figura 41 (b):

- Gerador de pulso marca Olympus® modelo 5077PR;
- Transdutor marca General Electric® de frequência central de 5 MHz;
- Osciloscópio Tektronix® modelo TDS 2024B uma frequência amostral de 200MHz.

**Figura 41** - (a) e (b) - Configuração experimental para medição de espessura de CP1 e CP2 e equipamentos utilizados.



(a)



(b)

### 3.6.2 Procedimento para execução dos ensaios

Para realização dos ensaios, foi sequenciado um procedimento de execução, visando a padronização e permitindo que se tenha repetibilidade na execução.

Os parâmetros ajustados para o procedimento experimental estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8** - Setup dos equipamentos.

Equipamento	Set
Transdutor	5 MHz
Frequência de repetição de pulso	100 Hz
Amplitude do pulso de excitação	100 Volts
Ganho	15 Db
HPF – Filtro Passa Alta	1 MHz
LPF – Filtro Passa Baixa	10 MHz

#### 3.6.2.1. Criação das referências de medidas no tubo externo de CP1

De início, CP1 foi colocado sobre a bancada e foram feitas marcações ao longo do tubo externo, utilizando como referência a borda do tubo. Sendo assim, projetou-se as medidas e posições dos rebaixos do tubo interno, na superfície externa do tubo externo, para que as medições de ultrassom pudessem ser feitas exatamente nos pontos de interesse. A Figura 42 ilustra estes 10 pontos de referências em CP1.

**Figura 42 - Pontos de referência em CP1**



### **3.6.2.2.Criação de referências de medidas no CP2**

Para CP2, como foram utilizadas as 6 geratrizes no tubo interno para gerar as linhas no tubo externo com as mesmas posições mostradas na Figura 7, então a princípio foram traçadas linhas longitudinais de uma borda a outra, tendo como ponto de referência cada geratriz, totalizando 6 linhas.

Em seguida, foram marcados os pontos 20 pontos de referência de medição sobre a superfície do tubo externo, tomando por base as medidas de posição onde foram coletadas as medições de espessura do tubo interno. A Figura 43 mostra um exemplo para os 120 pontos criados ao longo de CP2.

**Figura 43 - Linhas e pontos de referência para CP2.**



### 3.6.3 Preparação e realização dos ensaios em CP1

Com as referências dimensionais marcadas, retiraram-se as tampas dos *vents* instalados e encheu-se o corpo de prova com água, conforme mostrado na Figura 44. O enchimento foi gradual e lento, para permitir que o ar interno aos tubos de CP1 pudesse ser extraído. Na sequência ventou-se CP1 por cerca de 5 min, até a cessação de saída de bolhas de ar pelo *vent* oposto ao que estava sendo utilizado para enchimento. Uma vez ventado, os *vents* foram tampados, finalizando a preparação do passe.

**Figura 43** - Enchimento do corpo de provas com água

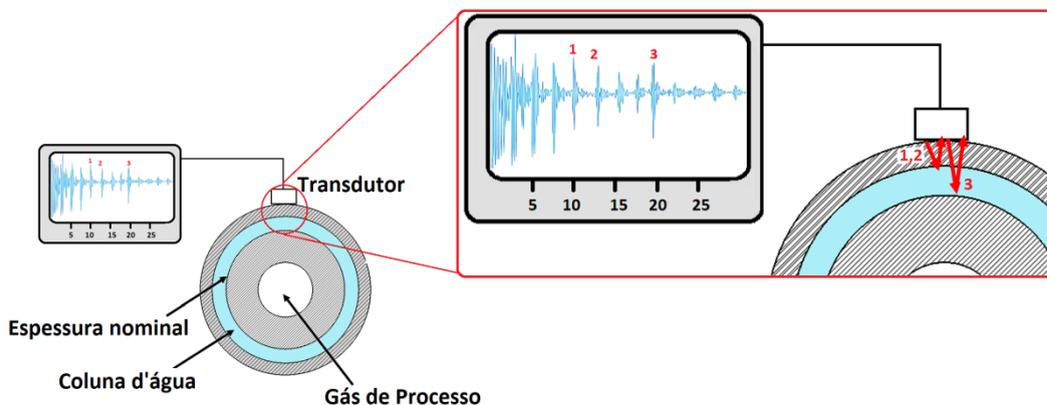


Com o corpo de prova pronto para o ensaio, CP1 foi nivelado sobre a bancada, então posicionou-se o transdutor de 5 MHz na posição da geratriz G e perpendicular à superfície do tubo externo, na sequência movimentou-se o transdutor até a marcação da posição do primeiro rebaixo, captando assim o sinal de ultrassom na forma *A-scan*. O procedimento foi repetido ao longo dos 10 rebaixos de CP1, resultando em 10 sinais que foram salvos em *pen drive*.

### 3.6.4 Método para análise dos sinais

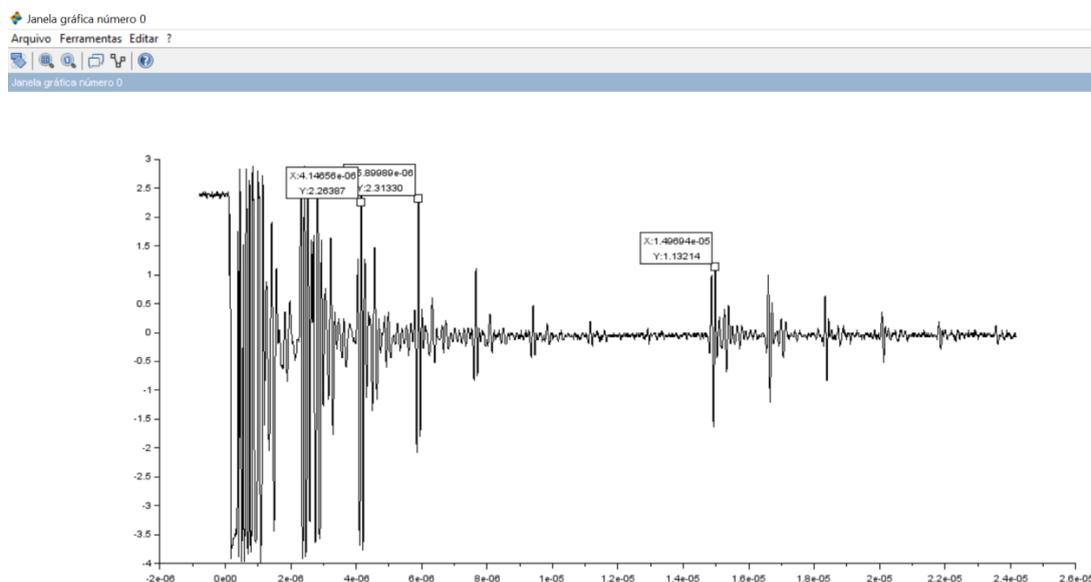
Uma vez coletados os sinais durante as inspeções em CP1, a análise destes sinais foi feita utilizando o *software* Scilab®. Os gráficos gerados permitiram determinar os picos referentes a espessura do tubo externo, o espaço entre tubos (coluna d'água), e então verificar se houve ou não perda de espessura na região inspecionada. O esquema de inspeção, captura e análise utilizado é mostrado na Figura 45. Os sinais 1 e 2 são referentes a espessura do tubo externo e o sinal marcado como 3 representa a coluna d'água.

**Figura 45** - Esquema de captura e análise dos sinais.



A Figura 46 ilustra o sinal processado no *software* Scilab<sup>®</sup>, onde é possível identificar os três picos de sinal, que servem como variáveis de entrada para os cálculos de espessura da parede do tubo interno.

**Figura 46** - Sinal *A-ScanN* gerado no Scilab<sup>®</sup>.



### 3.7 Cálculo Da Espessura Do Tubo Interno De CP1

Tendo em vista o cálculo da espessura do tubo interno CP1, primeiramente foram calculados os tempos de reflexão da água em microssegundos, pela equação 3.0. Na sequência, utilizando a equação 3.1, foi calculada a coluna de água em mm, a partir da velocidade de propagação do som na água e considerando que o sinal sai do transdutor e retorna em microssegundos. Por fim foi calculada a espessura do tubo interno de processo, tomando-se por

base a espessura da parede, a coluna de água originais do tubo e a coluna de água medida pelo ultrassom, conforme a equação 3.2.

$$R_a = P_a - (P1_e - P2_e) \quad (3.0)$$

Onde:

$R_a$  é o tempo de reflexão para a coluna de água;

$P_a$  é o tempo para o pico da coluna de água;

$P1_e$  é o tempo do primeiro pico para a parede do tubo externo;

$P2_e$  é o tempo do segundo pico para a parede do tubo externo.

$$C_m = R_a \times Vs_a / 2000 \quad (3.1)$$

Onde:

$C_m$  é a espessura da coluna de água em mm;

$R_a$  é o tempo de reflexão da coluna de água;

$Vs_a$  é a velocidade do som na água.

$$Ep = Ep_i + C_{mi} - C_m \quad (3.2)$$

Onde:

$Ep$  é a espessura do tubo interno;

$Ep_i$  é a espessura do tubo original, sem desgastes;

$C_{mi}$  é a coluna de água original, medida durante a montagem do CP;

$C_m$  é a coluna de água medida pelo sinal de ultrassom.

Aplicadas estas fórmulas, foi possível obter o resultado das espessuras nos 10 rebaiços de CP1, a partir da utilização do Microsoft Excel®.

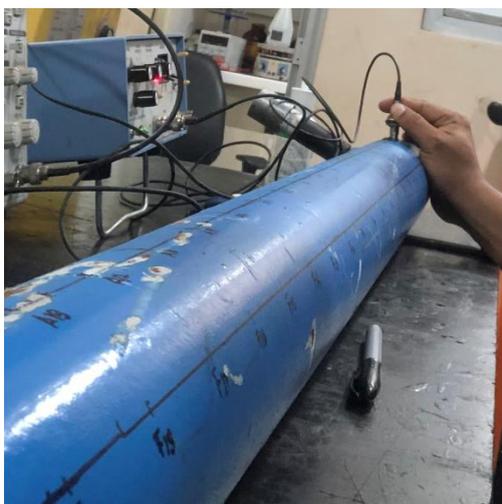
Os valores encontrados durante a inspeção em CP1 foram satisfatórios já na primeira rodada de captação dos sinais, com erros menores que 5% para a espessura da parede do tubo

interno calculada. Estes resultados serão mostrados na seção Resultados e discussões. Diante deste cenário positivo seguiu-se com a inspeção de CP2.

### 3.8 ENSAIOS COM ULTRASSOM NO FORMATO A-SCAN EM CP2

Com preparativos idênticos a CP1, o CP2 foi inspecionado com ultrassom no formato A-scan, em cada um dos 120 pontos marcados, conforme ilustra a Figura 47, com posterior armazenamento dos sinais de cada ponto em um pen drive.

**Figura 47** - Ensaio de ultrassom pulso eco em CP2.



Utilizando o mesmo método de análise dos sinais *A-scan*, e as equações 3.0, 3.1 e 3.2, será possível calcular também a espessura da parede do tubo interno de CP2 utilizando o Microsoft Excel<sup>®</sup>, para todas as seis geratrizes.

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS PARA CP1

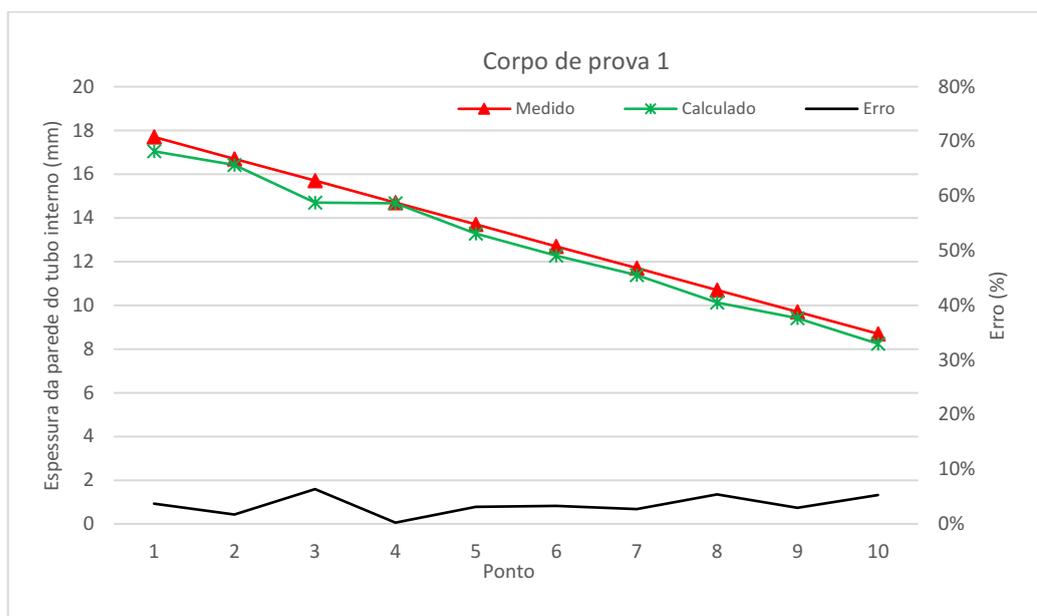
O corpo de prova CP1, foi projetado para validar o procedimento de medição da espessura do tubo interno de processo, fazendo a captação de sinais sem a necessidade de desmontagem do passe de um trocador de calor bitubular. A Tabela 9 contém os resultados obtidos para CP1 com o método proposto. O valor medido foi obtido com o medidor de espessura, enquanto o calculado foi obtido com o método. O erro médio foi de 3%, e o desvio padrão foi de 0,019. Estes últimos números evidenciam o bom ajuste do método e sua aplicabilidade.

**Tabela 9 - Resultados para CP1.**

Tabela de calculo para CP1									
Rebaixo	Pico tubo Externo		Parede tubo externo (mm)	Pico coluna de Água	Tempo de reflexão da coluna de água (µs)	Espessura Coluna de Água medida (mm)	Espessura do tubo interno - Calculado (mm)	Espessura do tubo interno - Medido (mm)	Erro
	Pico 1 (µs)	Pico 2 (µs)		Pico 3 do gráfico (µs)					
1	4,03853	5,79119	5,17	14,93630	13,18364	9,756	17,044	17,7	4%
2	4,37899	6,19722	5,36	15,85220	14,03397	10,385	16,415	16,7	2%
3	4,09962	5,83901	5,13	18,08960	16,35021	12,099	14,701	15,7	7%
4	4,07843	5,79988	5,08	18,11990	16,39845	12,135	14,665	14,7	0%
5	4,18896	5,91271	5,09	20,00000	18,27625	13,524	13,276	13,7	3%
6	5,77918	7,49573	5,06	21,33910	19,62255	14,521	12,279	12,7	3%
7	5,83381	7,56287	5,10	22,55930	20,83024	15,414	11,386	11,7	3%
8	5,81915	7,57773	5,19	24,29350	22,53492	16,676	10,124	10,7	6%
9	6,13617	7,98251	5,45	25,33940	23,49306	17,385	9,415	9,7	3%
10	6,21873	8,05945	5,43	26,91980	25,07908	18,559	8,241	8,7	6%

Pelos resultados da Tabela 9 pode-se verificar que o método conseguiu medir a espessura do tubo interno com eficiência. A Figura 48 apresenta o gráfico para os resultados para CP1.

**Figura 48** - Valores de espessuras medidos x Calculados para CP1 e o erro (%).



A medição da espessura da parede do tubo interno do trocador de calor bitubular, visa determinar a integridade do equipamento. A técnica atualmente utilizada, conforme mostrado na revisão bibliográfica, se baseia em apenas uma de medição de espessura em um dos 66 tubos do trocador. Apenas em CP1, que possui 1,5m foi possível medir com eficiência em 10 pontos.

Na prática, levando-se em conta taxa de corrosão original, o trocador deveria ter uma vida de pelo menos 12 anos segundo o fabricante do equipamento, mas ocorreu uma falha em 3 dos 66 tubos internos com cerca de 9,5 anos. Portanto, duraram 2,5 anos a menos que o projetado.

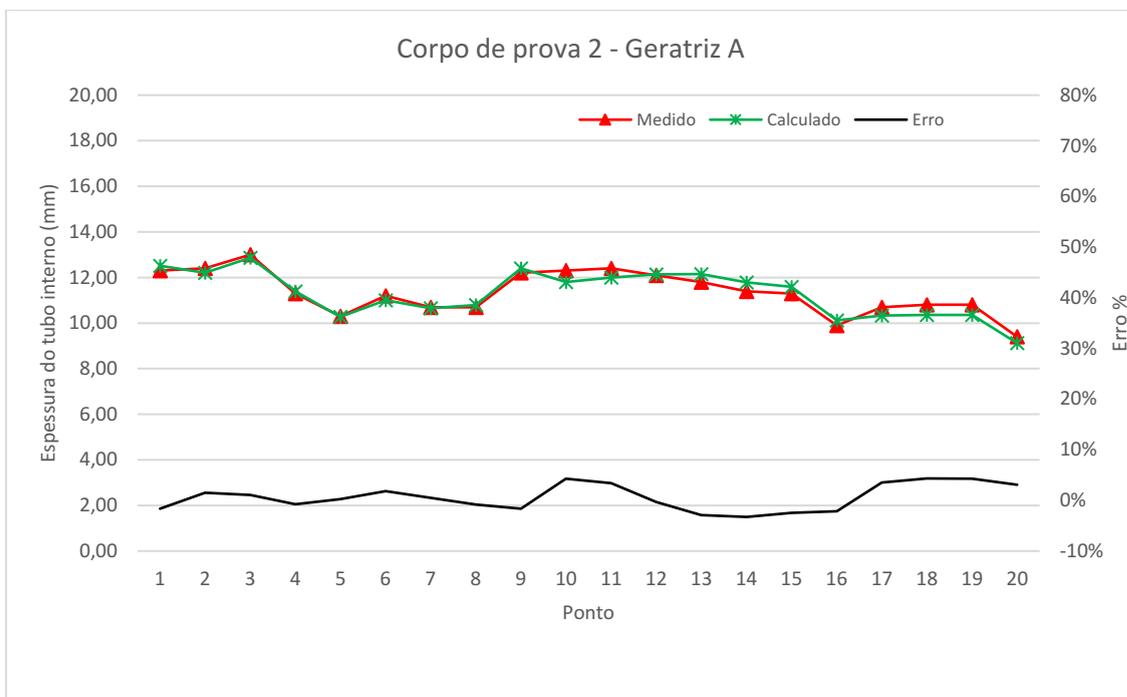
Um comparativo importante e definitivo quanto à aplicabilidade do método pode também ser feito utilizando-se a média do erro em milímetros nos 10 pontos de CP1 e comparar o impacto no cálculo da vida prevista para este trocador. Sendo assim, se consideramos que a taxa de corrosão original projetada para o equipamento é de 0,35 mm por ano, e que o erro médio em milímetros (considerando os oito pontos medidos) foi de 0,4 mm e que a diferença entre a espessura original e a mínima admissível para a parede do tubo interno é de 3,9mm, pode-se afirmar que ao invés de durar 12 anos aproximadamente pela extrapolação do valor da taxa de corrosão original, o trocador teoricamente duraria cerca de 9,75, anos pelo método proposto por este trabalho.

O valor de 9,75 anos está mais próximo da falha ocorrida na prática (9,5 anos) que os 12 calculados pela extrapolação da taxa de corrosão original. Pode-se creditar essa diferença ao número de pontos medidos, que aumenta a probabilidade de acerto do nível de integridade do equipamento.

### 4.2 RESULTADOS PARA CP2

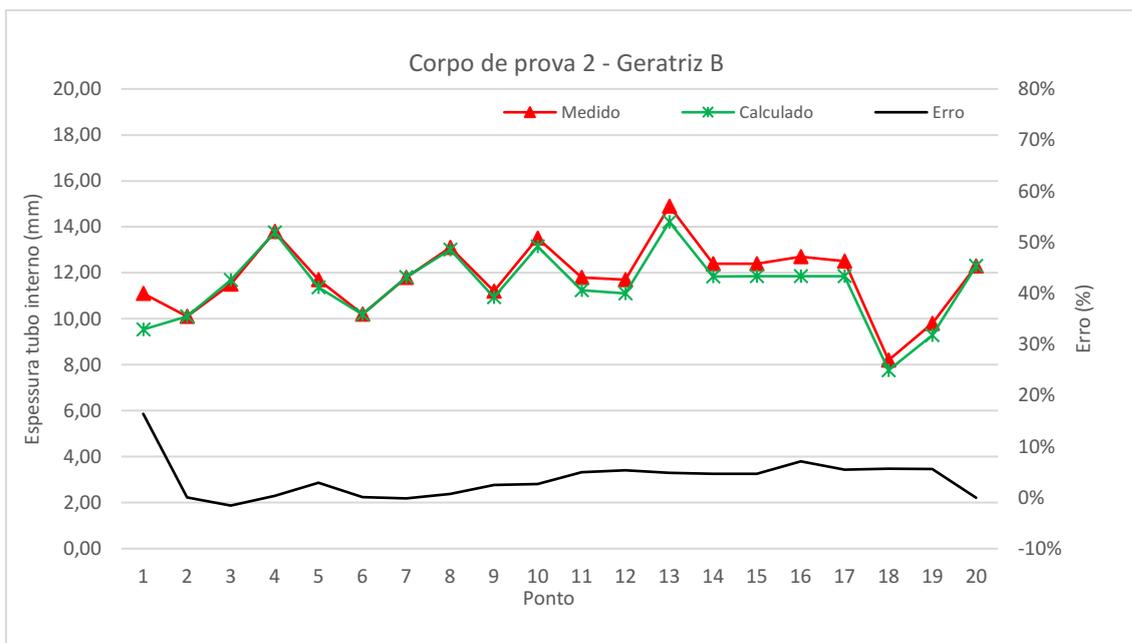
Para o corpo de prova CP2, as Figuras 49 a 54 ilustram os gráficos para as 6 geratrizes e cada um dos seus 20 pontos.

**Figura 49 - Resultados para CP2 – Geratriz A.**



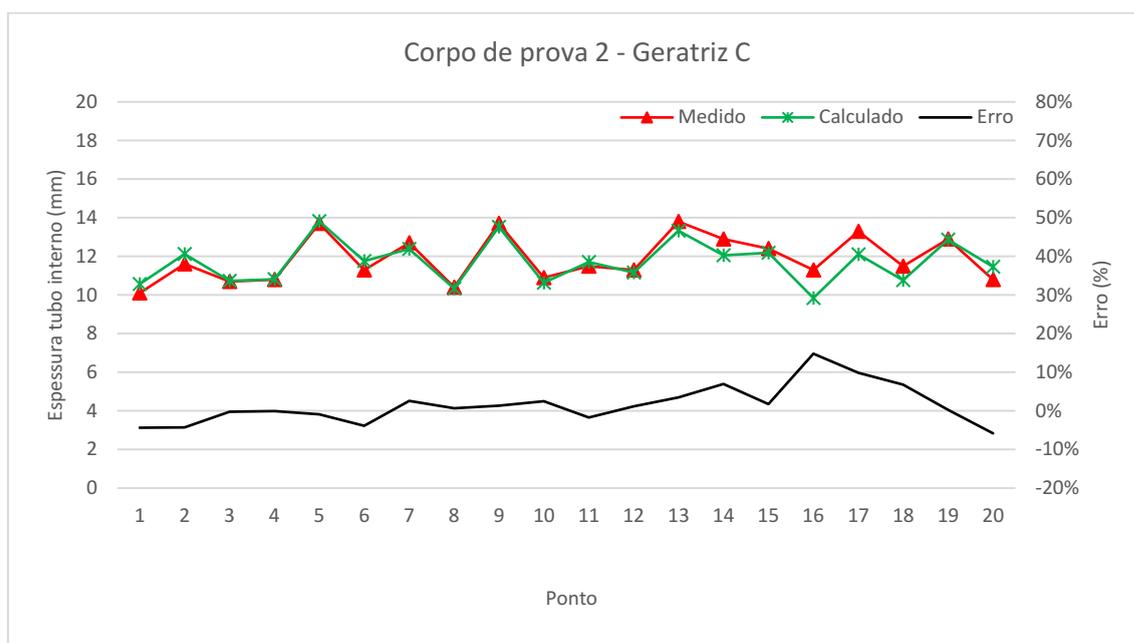
Para a geratriz A o erro médio foi de 2%, o desvio padrão foi de 0,02 e o erro médio em mm foi de 0,25mm. Os erros foram menores que o de CP1.

**Figura 50 - Resultados para CP2 – Geratriz B.**



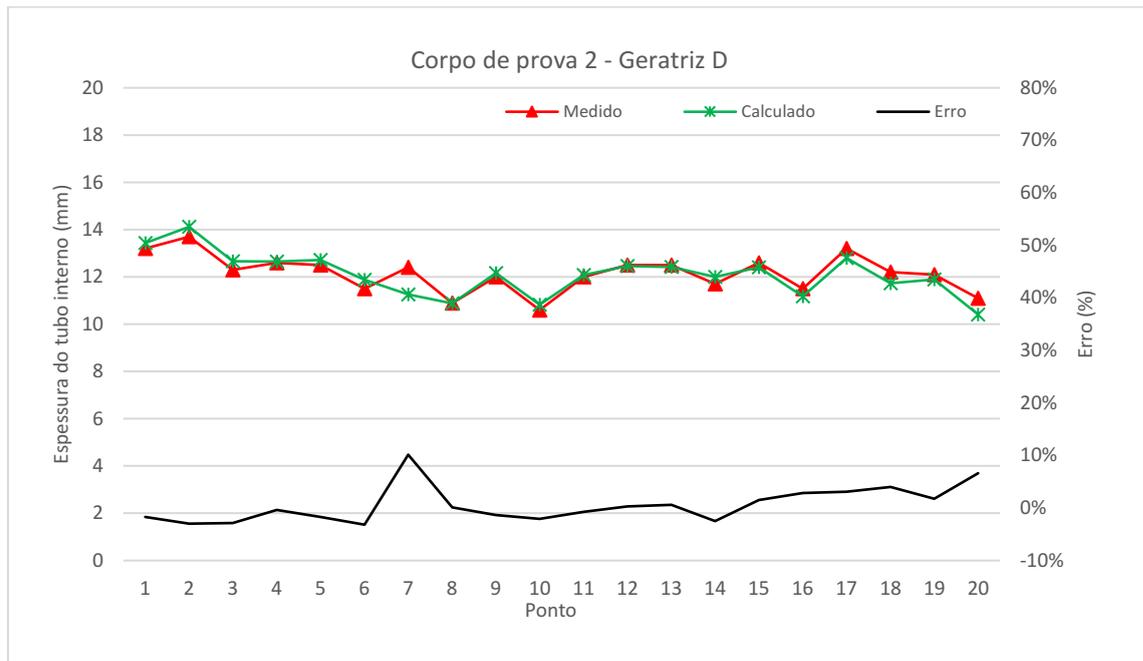
Para a geratriz B, o erro médio foi de 4%, o desvio padrão foi de 0,04 e o erro médio em mm foi de 0,41mm. Estes resultados, um pouco acima da geratriz A, e próximos de CP1, foram influenciados por um outlier na posição B1, posicionado na borda do corpo de prova, provavelmente influenciado por um alvéolo próximo ou na montagem do corpo de prova, uma vez que este ponto fica próximo da solda de fechamento de CP2.

**Figura 51** - Resultados para CP2 – Geratriz C.



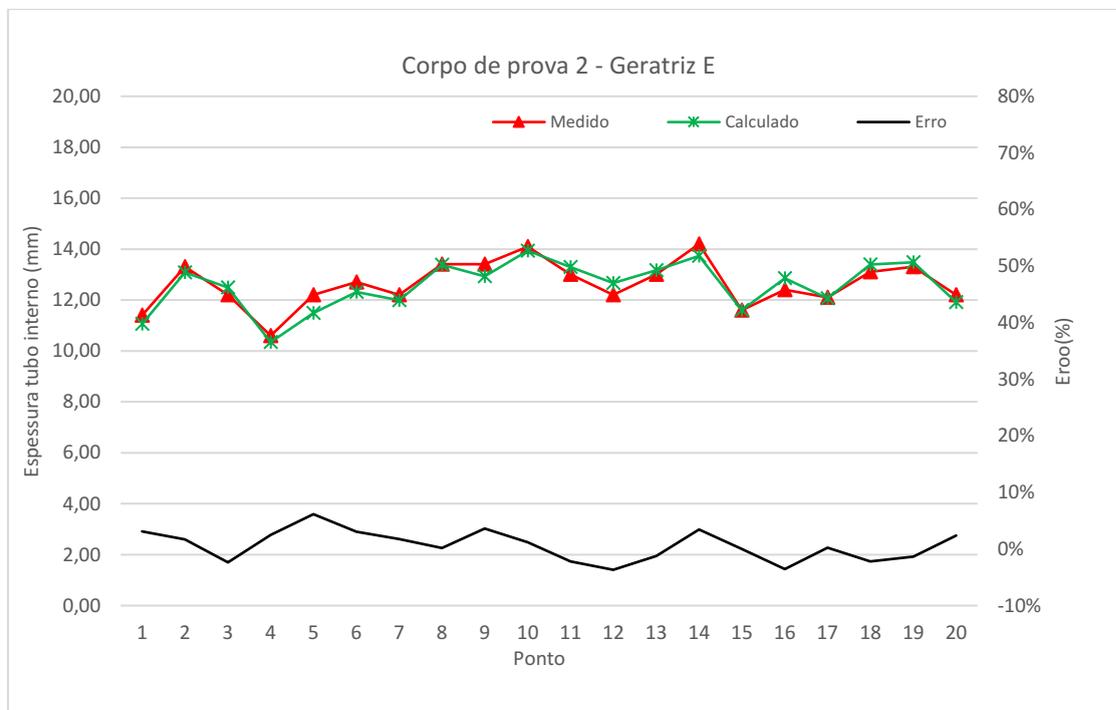
Para a geratriz C, o erro médio foi de 4%, o desvio padrão foi de 0,04 e o erro médio em mm foi de 0,42mm. Novamente dois outliers nas posições 16 e 17, influenciaram nestes resultados. É possível que este erro esteja relacionado à dificuldade da medição, devido a geometria irregular da superfície do tubo interno, em função da grande quantidade de alvéolos.

**Figura 52 - Resultados para CP2 – Geratriz D**



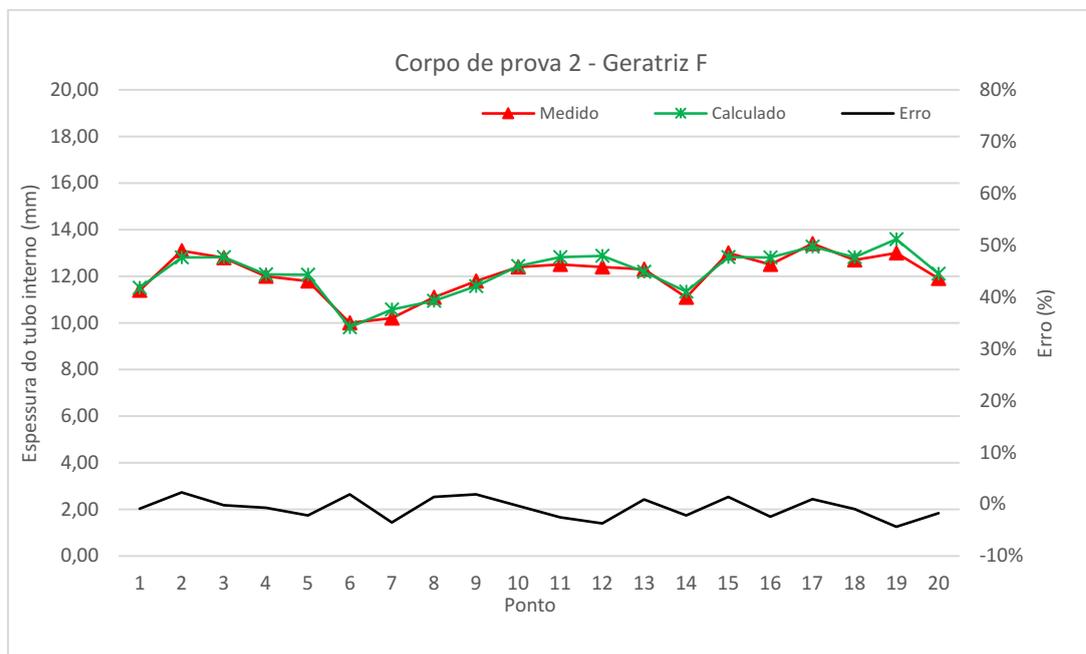
Para a geratriz D, o erro médio foi de 3%, o desvio padrão foi de 0,03 e o erro médio em mm foi de 0,3mm. Um resultado melhor que o de CP1 e parecido com o da geratriz A.

**Figura 53 - Resultados para CP2 – Geratriz E.**



Para a geratriz E, o erro médio foi de 2%, o desvio padrão foi de 0,02 e o erro médio em mm foi de 0,28mm. Um resultado melhor que o de CP1 e parecido com o da geratriz A e D.

**Figura 54** - Resultados para CP2 – Geratriz F.



Para a geratriz F, o erro médio foi de 2%, o desvio padrão foi de 0,02 e o erro médio em mm foi de 0,22mm. Um resultado melhor que o de CP1 e parecido com o da geratriz A, D e E.

No total dos 120 pontos medidos ao longo das seis linhas sobre as geratrizes, o erro médio foi de 3%, idêntico ao de CP1. O desvio padrão foi de 0,03, o que indica um bom ajuste do método e por fim, o erro médio foi de 0,3mm, um pouco abaixo de CP1.

A Tabela 10 apresenta os erros para os 120 pontos de CP2. Considerando-se que são outliers valores acima de 10%, apenas em quatro pontos teve-se um erro de medição acima deste patamar. Estes pontos poderiam ser desconsiderados para aumento da acuracidade dos valores, porém isto não foi feito.

A ocorrência dos outliers pode estar relacionada a montagem do corpo de prova, as imperfeições da superfície alveolar do tubo de processo, as limitações dos equipamentos utilizados ou até mesmo presença de ar no interstício entre os tubos. Todas estas dificuldades podem ser melhoradas em trabalhos futuros.

**Tabela 10** - Erros de medição para o tubo interno ao longo de CP2.

Ponto	A	B	C	D	E	F
1	-2%	16%	-4%	-2%	3%	-1%
2	2%	0%	-4%	-3%	2%	2%
3	1%	-2%	0%	-3%	-2%	0%
4	-1%	0%	0%	0%	2%	-1%
5	0%	3%	-1%	-2%	6%	-2%
6	2%	0%	-4%	-3%	3%	2%
7	1%	0%	3%	10%	2%	-4%
8	-1%	1%	1%	0%	0%	1%
9	-2%	2%	1%	-1%	4%	2%
10	4%	3%	3%	-2%	1%	0%
11	3%	5%	-2%	-1%	-2%	-3%
12	0%	5%	1%	0%	-4%	-4%
13	-3%	5%	3%	1%	-1%	1%
14	-3%	5%	7%	-3%	3%	-2%
15	-2%	5%	2%	2%	0%	1%
16	-2%	7%	15%	3%	-4%	-2%
17	4%	5%	10%	3%	0%	1%
18	4%	6%	7%	4%	-2%	-1%
19	4%	6%	0%	2%	-1%	-4%
20	3%	0%	-6%	7%	2%	-2%
Erro médio	1%	4%	2%	1%	1%	-1%

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

A indústria tem buscado a eficiência em todas as suas esferas, principalmente em segurança de processos, segurança das pessoas e os custos associados com a manutenção dos seus ativos.

A medição de espessura de tubos internos para trocadores de calor bitubulares em plantas de super alta pressão historicamente se mostrou um desafio seja pelas dificuldades de execução, seja pelos elevadíssimos custos de manutenção associados as inspeções para cálculos de vida residual do equipamento.

Este trabalho apresentou um método inovador, permitindo que as medições dos tubos internos, tubos estes de processo submetidos a condições de trabalho críticas, sejam feitas sem a necessidade de desmontar o equipamento, o que do ponto de vista de custos, prazos e facilidade de execução, se mostra um método vantajoso, diante da técnica aplicada convencionalmente.

A análise dos resultados apresentados mostrou que o corpo de prova 1, apresentou números satisfatórios de medição de espessura com o método proposto, com erro médio menor que 3%, com desvio padrão próximo de zero e erro de medição médio de 0,4mm. Isso possibilitou a aplicação do método no corpo de prova 2, oriundo de um equipamento que operou por 15 anos.

Os resultados para o corpo de prova 2, repetiram a eficiência dos números obtidos para o corpo de prova 1. Com desvio padrão próximo de zero, erro de 3% e erro de medição de 0,3mm. Isto permite afirmar que o método tem repetibilidade e consequente confiabilidade na aplicação.

Quando comparados os métodos atuais de abertura de janelas, IRIS e desmontagem total, com o método proposto para inspeção de trocadores bitubulares, as vantagens podem ainda ser maiores, uma vez que se pode aumentar a quantidade de pontos amostrados de um para centenas ou milhares, consequentemente aumentando a exatidão da inspeção.

A previsibilidade da vida e dos níveis de integridade dos ativos industriais, permite que as empresas possam planejar seus investimentos, além do aumento da segurança de processos e de pessoas. Neste ponto, este método permite uma boa correlação entre o desgaste real e o calculado, servindo como base para tomada decisão quanto aos investimentos necessários para a continuidade operacional dos ativos.

A aplicação do método apresentado não necessita da desmontagem do trocador e de grandes limpezas dos tubos internos, como por exemplo, na aplicação de IRIS. O método foi eficaz, medindo o tubo interno do trocador a partir da coluna de água e da espessura do tubo externo por fora. Uma inspeção com IRIS em um trocador bitubular de super alta pressão, como o simulado com os corpos de prova aqui apresentados, deve ser feita a cada 3 ou 6 anos, dependendo se a planta tem Serviço Próprio de Inspeção de equipamentos ou não, com um custo médio de R\$850.000 reais, entre mão de obra, ensaios e materiais. Neste sentido o método de inspeção aqui proposto é muito mais vantajoso, além do que, especificamente no caso da produção de polietileno, o IRIS não se mostrou eficaz em função da dificuldade de limpeza do tubo interno com hidrojato.

De uma forma geral, o método se mostrou eficaz e confiável, e sua aplicabilidade pode trazer ganhos nas inspeções de trocadores de calor bitubulares, onde estes são utilizados. Frente a competitividade atual da indústria, este método pode trazer ganhos financeiros significativos para as empresas, além de garantir a operabilidade das unidades em função da previsibilidade de falhas, uma vez que se pode ter um número maior de medidas das espessuras dos tubos de processo e conseqüentemente da vida residual do equipamento.

## SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Medição de tubos internos de trocadores de calor bitubulares, utilizando o método de *Phased-array*.
- Influência da utilização de cabeçotes customizados, para determinação da espessura dos tubos internos de um trocador de calor bitubular.
- Padronização da utilização de ultrassom na forma *A-scan* para medição da espessura de tubos internos de trocadores de calor bitubulares.
- Desenvolvimento de equipamento ultrassônico para medição direta da parede do tubo interno de trocadores de calor bitubulares, posicionando o transdutor no tubo externo.
- Utilização de correntes parasitas para medição de tubos internos de trocadores de calor bitubulares.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCUREN. Site da instituição. Disponível em <https://www.acuren.com/inspection>. Acesso em junho de 2023.
- AGUIRRE, Luis Antonio. Fundamentos de instrumentação. São Paulo: Pearson Education, 2013. 331 p.
- ALMEIDA, D. S. Materiais para fabricação de vasos de pressão de alto desempenho. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA DE MATERIAIS, 2ª ED. ABM, SÃO PAULO. 1997.
- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. ABS. Materials and Welding. Houston: ABS, 2014, Chapt 3-4.
- ANDREUCCI, A. Ensaio por Ultrassom. Edição Jun./2018. São Paulo:2018, 106p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11696: trocadores de Calor. Rio de Janeiro, 1991.
- AZEVEDO, J. L. Apontamentos de Permutadores de Calor–Equipamentos Térmicos. v. 8, 2005.
- BARTLETT, Dean A. The fundamentals of heat exchangers. The Industrial Physicist, v. 2, n. 4, p. 18-21, 1996.
- BEJAN, Adrian. Transferência de Calor. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1996.
- BOLLER, C. *et al.* Encyclopedia of Structural Health Monitoring. Ed. John Wiley and Sons, 1ª edição, Nova York, 2009.
- BROOK, M. V. Ultrasonic Inspection Technology Development and Search Unit Design. Editora Wiley, ed.1, Nova York, 2012.
- CARVALHO, L. J.; GENTIL V. Corrosão, LTC Editora, Sétima edição. 2022.
- ÇENGEL, Y.A. & BOLES, M.A. Termodinâmica. 5.ed. São Paulo, McGraw-Hill, 2012. 740p.
- CHANG, J. S. E MORALA, E. C., Determination of Two-Phase Interfacial Areas by an Ultrasonic Technique, Nuclear Engineering and Design, vol. 122, p 143-156,1990.
- CHEEKE, J. D. N. Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves. Editora CRC Press, ed.1, Londres, 2002.
- COUTINHO, Fernanda; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. Polímeros, v. 13, p. 01-13, 2003.

- DA COSTA VEIGA, Jordana Luiza Barbosa et al. Automação Da Análise Do Ensaio Ultrassônico Pulso-Eco Utilizando Redes Neurais Artificiais. In: III Pan-American Conference for Nondestructive Testing–PANNDT, Rio de Janeiro. 2003.
- DA SILVA, Rival Coelho; GHENO, Simoni Maria. Caracterização mecânica e estrutural do aço ASTM A131 classe DH36 em comparação com aço ASTM A36 utilizado para projetos estruturais. SITEFA-Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho, v. 1, n. 1, p. 153-168, 2018.
- DOAK, K. W.; JAMES, D. E. Ethylene polymers. Encyclopedia of polymer science and engineering, v. 6, p. 383-490, 1986.
- DOEBELIN, Ernest O.; MANIK, Dhanesh N. Measurement systems: application and design. 2007.
- EFIRD, K. D., *et al.* Correlation of Steel Corrosion in Pipe Flow with Jet Impingement and Rotating Cylinder Tests, Corrosion, v. 19, n. 12, p. 992-1003, 1993.
- FACCINI, José Luiz Horácio; PIO, Ronald R., LAMY, Carlos Alfredo, BITTENCOURT, Marcelo de Siqueira Queiroz. Repositório Institucional do IEN, 1997; Sistema para Medição de Velocidades de Escoamentos Através de Ondas Ultrassônicas.
- FANET, H. Medical Imaging Based on Magnetic Fields and Ultrasounds. 1. ed. [S.l.]: Wiley-ISTE, 2014. 3–26 p.
- FONSECA, Eduardo; Determinação indireta das propriedades mecânicas de aço ASTM A36 laminado, com o uso de ultrassom. Dissertação de mestrado. UFRGS. 2005.
- GONÇALVES, Raquel; MASSAK, Marcus Vinicius. Avaliação da sensibilidade do ultrassom na detecção de variações de propriedades da madeira em função da posição de retirada na tora. Madeira: arquitetura e engenharia, v. 10, n. 25, p. 49-58, 2009.
- INCROPERA, F. P. *et al.* Fundamentos de Transferência de calor e de massa, LTC Editora, Sexta edição. 2007.
- KERN, D. Q. Processos de Transmissão de Calor. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1980.
- LAMY, Carlos Alfredo et al. Um estudo sobre o dimensionamento de descontinuidades superficiais pela técnica ultrassônica do tempo decorrido. 1990.
- LEITE, Vitor Luis Conceição et al. Classificação Neural de Descontinuidades com Espectros de Frequência em Inspeção Ultrassônica por Imersão. In: VII CONNEPI-CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO. 2012.
- MARTIN, C. C. Ultrassom. Editora Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 1ª edição, São Paulo, 2012.
- MCCAFFERTY, E. Introduction to Corrosion Science. New York: Springer, 2010. 575p.

MINICUCCI, Domingos José. Avaliação de Tensões por Ultrassom no Aro de Rodas Ferroviárias Forjadas Novas–Classe C. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2003.

NYBY, John; WHITNEY, Glayde. Ultrasonic communication of adult myomorph rodents. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, v. 2, n. 1, p. 1-14, 1978.

OLIVEIRA, Bruno Furtado Montes. Algoritmos de detecção em sinais de ultrassom para medições de espessuras em alvos metálicos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

OLYMPUS. Site institucional do fabricante. Disponível em <http://www.olympus-ims.com/>. Acesso em 02 mai. 2023.

ORNELAS, R. Entendendo o ensaio de ultrassom IRIS. Belo Horizonte: New Wave NDT; acesso em 03 mar. 2023. Disponível em: <https://newwavendt.com.br/entendendo-o-ensaio-de-ultrassom-iris/>

PINHEIRO, Rayane Balieiro *et al.* Predição de propriedades mecânicas por ultrassom do aço estrutural ASTM A131 com e sem tratamentos térmicos. 2022.

PORTAL DO MTE - MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Disponível em < Ministério do Trabalho e Emprego ([www.gov.br](http://www.gov.br))> Acesso em: 10 de Março de 2023.

RANKRED. Site da instituição. Disponível em: [www.rankred.com/best-examples-of-longitudinal-waves/](http://www.rankred.com/best-examples-of-longitudinal-waves/). Acesso em junho de 2023.

REGO, Almeida *et al.* OTIMIZACAO DE CONTROLADOR PI PARA UM TROCADOR DE CALOR UTILIZANDO A METAHEURÍSTICA BAT ALGORITHM. Artigo da Universidade Federal do Rio grande do Norte. 2015. 7p.

RIBEIRO, I., FARIAS, C., SANTOS, Y., SILVA, L., LOPES, J., Ensaio Não Destrutivo Ultrassônico por Imersão em Trecho de Duto Utilizando Filtragem Digital, In: IV CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE-NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009, Belém - PA. IV CONNEPI;

RODRIGUES, A. M., SILVA Mineiro, E. S. *Qualificação no Ensaio por Ultra – Som Nível I*. IFI /CTA / Subdivisão de Treinamento, 2000, 23p.

ROSE, J. L. Ultrasonic waves in solid media. New York: Cambridge University Press, 1999. 454p.

SANTIN, J. L., Ultrassom: Técnica e Aplicação. 2ª edição, Curitiba, Artes Gráficas e Editora Unificada, 1996. 288p.

SHAH, Ramesh K.; SEKULIC, Dusan P. Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons, 2003.

SILVA, Andre Luiz da Costa E.; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. Edgard Blücher, 2008.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. Vasos de Pressão. 2ª edição atualizada; Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1996.

TEC-SCIENCE. Site da instituição. Disponível em <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/ultrasonic-testing-ut/>. Acesso em junho de 2023.

TSUNG, Jim. History of ultrasound and technological advances. In: World Congress Ultrasound in Medical Education ([www.wcume.org](http://www.wcume.org)). 2015.

UFP. Site da Instituição. Disponível em <http://homepage.ufp.pt/biblioteca/>. Acesso em Junho de 2023.

VIEIRA, S. L., Desenvolvimento de um "phantom" para treinamento de biópsia de mama guiada por ultrassom. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto. Universidade São Paulo. Ribeirão Preto, 2005.

VIEZZER, Mariana. Reator tubular de alta pressão para produção de PEBD: simulação e análise comparativa da geometria proposta em reator previamente instalado. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

WERMAC. Site da instituição. Disponível em: <http://www.wermac.org/others>. Acesso em Junho de 2023.