

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

**JULIANO WALTER SILVA**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS  
ULTRASSÔNICOS PARA O  
MONITORAMENTO DA DEGRADAÇÃO  
EM FADIGA DE TUBOS DE PRFV.**

Porto Alegre  
2021

**JULIANO WALTER SILVA**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS  
ULTRASSÔNICOS PARA O  
MONITORAMENTO DA DEGRADAÇÃO  
EM FADIGA DE TUBOS DE PRFV.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Thomas G.R. Clarke**

Porto Alegre  
2021

**JULIANO WALTER SILVA**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS  
ULTRASSÔNICOS PARA O  
MONITORAMENTO DA DEGRADAÇÃO  
EM FADIGA DE TUBOS DE PRFV.**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Thomas G.R. Clarke, UFRGS  
Professor do Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ignácio Iturrioz, UFRGS  
Professor do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

Dr. Lúcio de Abreu Corrêa, UFRGS  
Fundação de Apoio a Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Toni Roger Schiefelbein de Lima, UFRGS  
Fundação de Apoio a Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Coordenador do PPGEM: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre, Agosto de 2021.

### CIP - Catalogação na Publicação

Walter Silva, Juliano  
Avaliação de métodos ultrassônicos para o  
monitoramento da degradação em fadiga de tubos de PRFV  
/ Juliano Walter Silva. -- 2021.  
88 f.  
Orientador: Thomas Gabriel Rosauro Clarke.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Compósito. 2. Ondas Guiadas. 3. Ultrassom. 4.  
Fadiga. 5. Índice de dano. I. Rosauro Clarke, Thomas  
Gabriel, orient. II. Título.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais e meu irmão, meus grandes incentivadores ao longo de toda a minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, pela orientação, por seu esforço e dedicação para com a gerência do Grupo de Ensaio Não Destrutivo (GEND) do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) e pela oportunidade que me foi dada.

Ao Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima pelo incentivo e por sua preocupação e dedicação para à parte acadêmica e experimental do trabalho.

Ao Dr. Lúcio de Abreu Corrêa pelo incentivo a utilizar ferramentas de programação e pelas inúmeras sugestões de artigos para leitura.

Ao Dr. Ricardo Callegari Jacques pelos conselhos e sugestões ao longo do trabalho.

Aos amigos Augusto Mengarda, Bruna Camacho, Daniel Saraiva, Eduardo Groth, Felipe Lutckmeier, Lucas Schmidt e Rodrigo Praetzel pela companhia durante o dia a dia de trabalho.

Em especial à minha família e amigos, pela paciência e pelo contínuo incentivo ao longo desses anos de formação.

Por fim, agradeço àqueles que, de alguma forma, ajudaram-me nessa caminhada. De coração.

## RESUMO

A busca incessante por materiais leves e com boa resistência química e mecânica tem sido uma das principais forças motrizes para o desenvolvimento dos materiais compósitos. No entanto, os materiais compósitos laminados do tipo PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro) são de natureza anisotrópica, heterogênea e com alta atenuação acústica, o que dificulta a inspeção e monitoramento através de métodos acústicos e torna a avaliação de integridade estrutural desses materiais bem mais desafiadora quando comparada com componentes metálicos. Neste trabalho é realizada uma avaliação do potencial de métodos ultrassônicos para o monitoramento da degradação de tubos de PRFV submetidos a fadiga. Duas diferentes técnicas de monitoramento foram avaliadas, uma baseada em ultrassom convencional/volumétrico (com ondas do tipo longitudinal) e outra baseada em ondas guiadas, para ambas técnicas foram utilizadas diferentes metodologias de inspeção. Para a técnica de ondas guiadas foram analisadas, por meio de índices de dano, diferentes métricas como atenuação, alteração de fase e mudanças no espectro de frequência. O efeito da temperatura também foi analisado para cada uma das métricas avaliadas. Para avaliação dos métodos os mesmos foram aplicados para monitoramento de tubos de PRFV submetidos a ensaio de fadiga com razão de carregamento  $R=0,1$  aplicada através de variação da pressão interna. Como referência indicativa do grau de degradação do material foram utilizadas as variações de um estimador da propriedade elástica nas direções longitudinal e circunferencial as quais foram determinadas a partir do monitoramento de deformações superficiais com extensômetro de resistência elétrica. Os resultados demonstraram que a técnica de ultrassom convencional não foi satisfatória para as condições metodológicas utilizadas neste trabalho. Já a técnica de ondas guiadas mostrou potencial para monitoramento da degradação do material desde que aplicados os métodos adequados para análise dos resultados. Os resultados obtidos pela técnica de ondas guiadas mostraram um comportamento semelhante às variações da propriedade elástica detectadas com o monitoramento das deformações. Além disso, foi possível verificar quantitativamente qual métrica mais adequada para detecção de danos de fadiga em materiais compósitos. Sendo assim, esses métodos abrem oportunidades promissoras que contribuem para a utilização da técnica de ondas guiadas em sistemas de avaliação da integridade estrutural em dutos fabricados em PRFV.

**Palavras-chave:** Compósito, fadiga, ultrassom, ondas guiadas, Índice de dano.

## ABSTRACT

The endless search for lightweight materials with good chemical and mechanical resistance has been one of the main driving forces for the development of composite materials. However, GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) laminated composite materials are anisotropic, heterogeneous and have high acoustic attenuation, which makes the inspection and monitoring through acoustic methods difficult and makes the structural integrity assessment of these materials much more challenging when compared to metallic components. In this study, an evaluation of the potential of ultrasonic methods for monitoring the degradation of GFRP pipes subjected to fatigue is performed. Two different monitoring techniques were evaluated, one based on conventional/volumetric ultrasound (with longitudinal waves) and the other based on guided waves, for both techniques different inspection methodologies were used. In the guided wave technique different metrics such as attenuation, phase shift, and changes in the frequency spectrum were analyzed using damage indexes. In addition, the effect of temperature was analyzed for each of the metrics evaluated. In order to perform the evaluation, the methods were applied for monitoring GFRP pipes subjected to fatigue testing with loading ratio  $R=0.1$  applied by varying the internal pressure. As an indicative reference of the material degradation degree, the variations of an estimator of the elastic property in the longitudinal and circumferential directions were used, which were determined from the monitoring of surface deformations with an electrical resistance strain gauge. The results showed that the conventional ultrasound technique was not satisfactory for the methodological conditions used in this work. The guided waves technique showed potential for monitoring the degradation of the material since the appropriate methods are applied to analyzing the results. The results obtained by guided wave technique showed a similar behavior to the elastic property variations detected with the strain monitoring. Furthermore, it was possible to quantitatively verify which metric was most suitable for detecting fatigue damage in composite materials. Thus, these methods open promising opportunities that contribute to the use of the guided wave technique in structural integrity assessment systems in GFRP pipelines.

**Keywords:** composite, fatigue, ultrasound, guided waves, damage index.



# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> . . . . .	9
<b>LISTA DE TABELAS</b> . . . . .	12
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	16
<b>2.1 Materiais compósitos</b> . . . . .	16
2.1.1 Compósitos reforçados com fibras . . . . .	17
2.1.2 Fibra de vidro como fase de reforço . . . . .	17
2.1.3 Resina ester vinílica como matriz polimérica . . . . .	18
2.1.4 Filament Winding . . . . .	18
2.1.5 Mecanismos de dano em materiais compósitos . . . . .	19
2.1.6 Classes de simetrias . . . . .	21
<b>2.2 Ensaios não destrutivos para materiais compósitos</b> . . . . .	22
2.2.1 Extensometria de resistência elétrica . . . . .	23
2.2.2 Métodos acústicos . . . . .	25
<b>3 METODOLOGIA</b> . . . . .	33
<b>3.1 Materiais</b> . . . . .	33
3.1.1 Tubo de PRFV fabricado por <i>Filament Winding</i> . . . . .	33
<b>3.2 Métodos</b> . . . . .	35
3.2.1 Ensaio de fadiga . . . . .	35
3.2.2 Extensometria de Resistência Elétrica . . . . .	36
3.2.3 Ultrassom convencional . . . . .	38
3.2.4 Ondas guiadas . . . . .	40
3.2.5 Ensaio de temperatura . . . . .	47
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	49
<b>4.1 Extensometria de resistência elétrica</b> . . . . .	49

4.1.1	Degradação do estimador da propriedade elástica do tubo . . . . .	49
<b>4.2</b>	<b>Ultrassom convencional</b> . . . . .	<b>51</b>
4.2.1	Projeto da sapata piramidal . . . . .	51
4.2.2	Apresentação do sinal . . . . .	54
4.2.3	Avaliação do tempo de voo . . . . .	54
<b>4.3</b>	<b>Ondas guiadas</b> . . . . .	<b>56</b>
4.3.1	Apresentação do sinal . . . . .	56
4.3.2	Avaliação da influência da temperatura nos índices de dano . . . . .	57
4.3.3	Avaliação da influência da fadiga nos índices de dano . . . . .	69
4.3.4	Avaliação da correlação entre índices de dano e a queda estimador da propriedade elástica. . . . .	75
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

1	Esquema de classificação dos materiais compósitos. . . . .	16
2	Danos em compósito em função da vida em fadiga percentual. . . . .	20
3	Ponte de <i>Wheatstone</i> genérica. . . . .	24
4	Comparação entre onda volumétrica e dois métodos de ondas guiadas. . . .	26
5	Etapa de produção do liner . . . . .	34
6	Etapa de produção da camada estrutural por <i>Filament Winding</i> . . . . .	34
7	Diagrama esquemático do sistema utilizado para o controle e aplicação da pressão nos tubos de PRFV. . . . .	36
8	Equipamento ULTRA-SOM MULTICANAL utilizado para as inspeções. . .	38
9	Sapata piramidal após sua confecção acoplada em um tubo de PRFV. . . .	39
10	Representação da transformada de Hilbert em um sinal de ultrassom conven- cional. . . . .	40
11	Esquema da geometria do tubo e do posicionamento dos sensores. . . . .	41
12	Bancada utilizada para os ensaios no vibrômetro e o esquema utilizado para avaliação dos modos de propagação do sensor. . . . .	42
13	Relação entre frequência e número de onda. . . . .	43
14	Diagrama esquemático do sistema utilizado para emissão e recepção dos sinais de ondas guiadas nos tubos de PRFV. . . . .	44
15	Variação de temperatura para os três termopares utilizados durante a avalia- ção da influência da temperatura. . . . .	47
16	Resistência elétrica projetada para o aquecimento durante o ensaio de tem- peratura. . . . .	48
17	Variação do estimador da propriedade elástica longitudinal e circunferencial durante o ensaio de fadiga para a amostra A e B. . . . .	50
18	Modelo que foi implementado no software CIVA® para simular um transdu- tor de 1 MHz com 1/2" de diâmetro incidindo no tubo através da sapata e o campo acústico resultante. . . . .	52

19	Modelo que foi implementado no software CIVA® para simular um transdutor de 1 MHz com 1/2" de diâmetro incidindo no tubo através da sapata e o campo acústico resultante. . . . .	53
20	Sinais representativos das aquisições de ultrassom convencional para um dos pontos de inspeção nas condições de fluido interno ar e água. A região em destaque representa o segmento do sinal referente a reflexão da parede interna do tubo. . . . .	54
21	Distribuição do tempo de voo ao longo do ensaio de fadiga para a amostra A (a) e B (b). . . . .	55
22	Sinal em quatro diferentes estágios de degradação para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b). A região em destaque representa o fragmento do sinal utilizado para aplicação dos índices de dano. . . . .	56
23	Transformada rápida de Fourier para o sinal inteiro e após o janelamento com a função <i>tukey.m</i> do software <i>MATLAB</i> ® para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b). . . . .	57
24	Variação do sinal de onda guiada a 12°C, 22°C e 41°C. . . . .	58
25	Índice de dano relação de energia de Hilbert versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b). . . . .	59
26	Variação máxima do índice de dano relação de energia de Hilbert no intervalo de temperatura entre 24 e 32°C. . . . .	60
27	Índice de dano correlação cruzada máxima percentual versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b). . . . .	62
28	Variação máxima do índice de dano correlação cruzada máxima percentual no intervalo de temperatura entre 24 e 32°C. . . . .	63
29	Índice de dano coeficiente de diferença de sinal versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b). . . . .	64
30	Variação máxima do índice de dano coeficiente de diferença de sinal no intervalo de temperatura entre 24 e 32°C. . . . .	65
31	Índice de dano perda central de espectro versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b). . . . .	67
32	Variação máxima do índice de dano perda central de espectro no intervalo de temperatura entre 24 e 32°C. . . . .	68

33	Variação percentual do estimador da propriedade elástica calculado a partir técnica de ERE e o índice de dano relação de energia de Hilbert calculado pela técnica de OG versus o número de ciclos, considerando as direções circunferencial e longitudinal. . . . .	70
34	Variação percentual do estimador da propriedade elástica calculado a partir técnica de ERE versus o índice de dano correlação cruzada máxima percentual calculado pela técnica de OG, considerando as direções circunferencial e longitudinal. . . . .	72
35	Variação percentual do estimador da propriedade elástica calculado a partir técnica de ERE versus o índice de dano coeficiente de diferença de sinal calculado pela técnica de OG, considerando as direções circunferencial e longitudinal. . . . .	73
36	Variação percentual do estimador da propriedade elástica calculado a partir técnica de ERE versus o índice de dano perda central de espectro calculado pela técnica de OG, considerando as direções circunferencial e longitudinal.	74
37	Correlação entre o sinal de OG e medida de degradação da propriedade elástica para o índice de dano relação de energia de Hilbert. . . . .	76
38	Correlação entre o sinal de OG e medida de degradação da propriedade elástica para o índice de dano correlação cruzada máxima percentual. . . .	77
39	Correlação entre o sinal de OG e medida de degradação da propriedade elástica para o índice de dano coeficiente de diferença de sinal ( <i>SDC</i> ). . . .	78
40	Correlação entre o sinal de OG e a medida de degradação da propriedade elástica para o índice de dano perda central de espectro. . . . .	79

## LISTA DE TABELAS

1	Principais características dos tubos de PRFV fabricados por <i>Filament Winding</i> .	35
2	Parâmetros de carregamento por pressurização interna utilizados nos ensaio de fadiga. . . . .	35

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização de tubulações de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) aumentou significativamente na indústria offshore de petróleo e gás nos últimos anos. Entre as vantagens relevantes atribuídas aos compósitos, estão a alta resistência específica e elevada resistência a corrosão. Atualmente, esses materiais são utilizados em diversas aplicações, sendo os setores aeroespacial, automotivo, naval e de petróleo e gás os principais consumidores dessa classe de materiais (RESCALVO et al., 2018). Entretanto, a utilização em maior escala desse tipo de material em diversas aplicações encontra como um dos maiores obstáculos a falta de uma metodologia confiável para a avaliação da integridade estrutural e que permita monitorar e garantir a funcionalidade e segurança operacional do componente ao longo da sua vida útil.

Para uma correta avaliação da integridade estrutural de componentes produzidos com material compósito é fundamental a obtenção de informações confiáveis quanto à degradação das propriedades elásticas do material e nível de dano do componente. Para obtenção dessas informações é necessária a utilização de métodos de ensaio não destrutivos adequados. Todavia, devido a estrutura heterogênea e anisotrópica dos materiais compósitos, a falha não é determinada pela simples propagação de uma trinca, como ocorre na grande maioria dos materiais metálicos, mas sim por uma combinação sucessiva de defeitos que agem sinergicamente na degradação do material. Sob carregamento cíclico, a formação de trincas transversais na matriz é o início de um processo complexo de eventos que ocorrem na estrutura do material. Esse acúmulo sequencial de múltiplas trincas ao longo da espessura do componente determina a degradação da rigidez, a resistência residual e a vida útil de um compósito laminado. De acordo com a redução do módulo de elasticidade em laminados de PRFV é função da densidade de trincas transversais.

Tubulações de PRFV são utilizadas já há algumas décadas para transporte de fluidos na indústria de petróleo e gás, tanto para aplicações em terra como em plataformas. No entanto, a dificuldade de inspeção e monitoramento para permitir a avaliação da segurança operacional restringe o avanço da utilização desse material tanto para condições similares ou de maior criticidade em que o PRFV poderia ser uma alternativa muito mais interessante em substituição a outros materiais (TOWSYFYAN et al., 2019). O desenvolvimento de uma metodologia segura e de alta confiabilidade para inspeção e monitoramento, juntamente com a correta seleção de técnicas de ensaios não-destrutivos são critérios essenciais para avaliar o estágio de degradação

dessas tubulações.

O ultrassom é uma das técnicas mais utilizadas para a detecção não destrutiva de danos por fadiga em estruturas de compósito usado em aeronaves, navios, infraestrutura civil e muitas outras aplicações. Várias propriedades dos materiais, incluindo rigidez (através da medição das velocidades das ondas elásticas), fração de volume de vazios e atenuação, além de vários modos de danos, incluindo delaminação e trincamento de matriz, são monitorados por diferentes métodos ultrassônicos (GHOLIZADEH, 2016).

Ao contrário dos materiais isotrópicos, a velocidade de ultrassom em materiais anisotrópicos apresenta dependência com a direção de propagação da onda. Além disso, materiais laminados em camadas são extremamente suscetíveis ao fenômeno de dispersão da onda que ocorre tanto para meios isotrópicos quanto para anisotrópicos. Essas especificidades inerentes à estrutura dos materiais compósitos dificultam a inspeção por meio de métodos acústicos de ensaios não destrutivos. Essa dualidade entre dificuldade de inspeção e a elevada capacidade de interrogação gera a necessidade do desenvolvimento de métodos mais robustos de análise, cujo nível de confiabilidade para a caracterização da degradação é dependente da correta seleção da metodologia utilizada para instrumentação, aquisição e análise de dados. Portanto, a utilização de métodos ultrassônicos adequados aliados à metodologias mais robustas de análise de dados podem permitir a correlação entre dados de monitoramento e inspeção com o estado de degradação de tubos de PRFV.

Para o métodos volumétrico, a técnica de ultrassom convencional para o cálculo do tempo de voo é avaliada como uma alternativa para verificação da degradação do tubo compósito. Essa investigação foi realizada baseando-se na hipótese de que a técnica de ultrassom convencional, por ter como princípio básico a interrogação da microestrutura, seria capaz de observar variações no sinal devido aos danos graduais gerados durante o ensaio mecânico. No entanto, os resultados demonstraram que a técnica de ultrassom não foi satisfatória para as condições metodológicas utilizadas neste trabalho.

Já para o método de ondas guiadas, foram analisadas, por meio de três índices de dano, diferentes métricas como atenuação, alteração de fase e mudanças no espectro de frequência. O efeito da temperatura foi verificado para cada uma das métricas avaliadas. Os resultados obtidos pela técnica de ondas guiadas mostraram um comportamento semelhante às variações da propriedade elástica detectadas com o monitoramento das deformações. Além disso, foi possível verificar quantitativamente qual métrica mais adequada para detecção de danos de fadiga em tubos de PRFV e qual a mais sensível a variação de temperatura. Sendo assim, esses métodos abrem oportunidades promissoras que contribuem para a utilização da técnica de ondas guiadas em sistemas de avaliação da integridade estrutural para tubos fabricados em PRFV.

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de utilização de métodos ultrassônicos para monitoramento da degradação mecânica de tubos de PRFV devido à fadiga. Para tanto, ensaios de fadiga foram realizados em tubos de PRFV a fim de promover a degradação do material. Durante o ensaio são realizadas medições periódicas utilizando dois métodos diferentes da



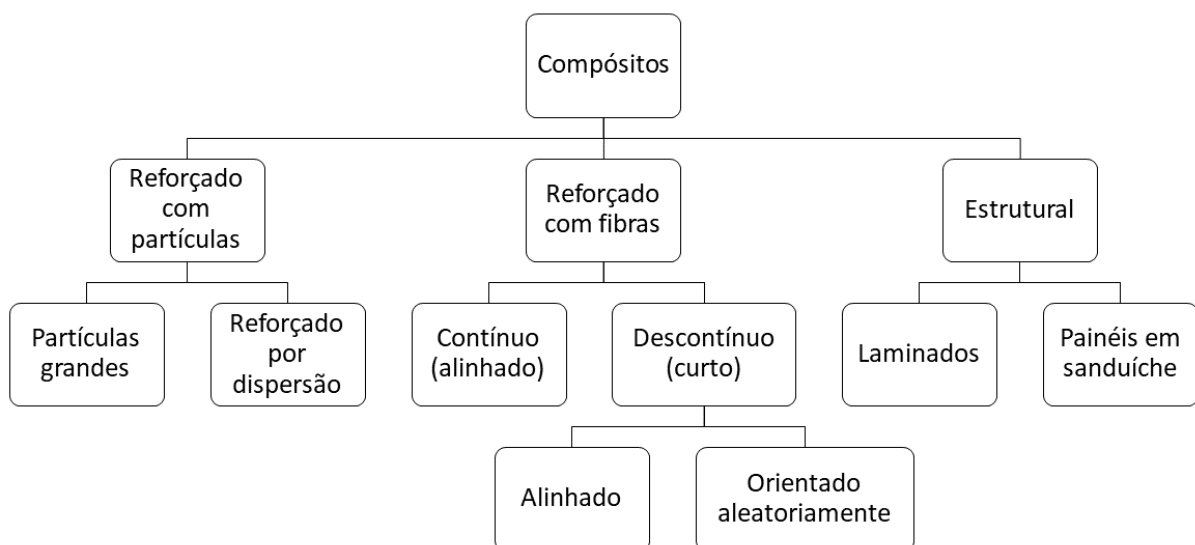
técnica de ultrassom, um baseado na inspeção volumétrica e outro baseado em ondas guiadas. Adicionalmente, extensometria de resistência elétrica é utilizada para monitoramento de deformações a fim de permitir a determinação da variação de um estimador da propriedade elástica nas direções longitudinal e circunferencial da amostra. Essa variação do estimador da propriedade elástica está correlacionada com o aumento de danos na estrutura do material e é utilizada como indicativo da degradação da rigidez do material durante o ensaio de fadiga.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Materiais compósitos

Basicamente pode-se definir compósito como um material multifásico cujas propriedades sejam uma combinação das propriedades das duas ou mais fases que o constituem. No entanto, essa definição não é suficiente para definir de forma exata a classe de materiais compósitos. De acordo com Matthews e Rawlings (1994) três critérios devem ser satisfeitos para que um material seja classificado como compósito. Primeiramente, ambos os constituintes devem estar presentes em proporções razoáveis (e.g. 5%). Em segundo lugar, é somente quando as fases possuem propriedades diferentes e, portanto, as propriedades do compósito são notavelmente diferentes das propriedades dos constituintes que chegamos a reconhecer esses materiais como compósitos. Por fim, um compósito feito pelo homem é geralmente produzido pela mistura íntima e combinação de constituintes por vários meios. Um simples esquema de classificação dos materiais compósitos é ilustrado na Figura 1, que consiste em três divisões principais: reforçado com partículas, reforçado com fibras e estruturais.

Figura 1: Esquema de classificação dos materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister, 2014

### **2.1.1 Compósitos reforçados com fibras**

Compósitos reforçados com fibras têm sido utilizados com sucesso por muitas décadas como materiais de engenharia; eles foram projetados e fabricados para várias aplicações, como construções marítimas, aeronaves, automóveis, construção civil e variados componentes estruturais (HULL; CLYNE, 1996). Um compósito reforçado por fibra geralmente consiste em três regiões: (i) as fibras como fase descontínua ou dispersa, (ii) a matriz como fase contínua, e (iii) a fina região entre as fases, também conhecida como interface (MUKHOPADHYAY; ADAK, 2018). O desempenho mecânico de um compósito reforçado por fibras depende basicamente da resistência mecânica e módulo de elasticidade da fibra, resistência mecânica e estabilidade química da matriz e da eficiência da ligação interfacial entre matriz e fibra em transferir a sollicitação mecânica (ERDEN et al., 2010). As propriedades dos compósitos são uma função entre as propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas, e da geometria da fase dispersa (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

### **2.1.2 Fibra de vidro como fase de reforço**

Uma ampla gama de materiais é utilizada para fabricação de fibras como fase de reforço em materiais compósitos, alguns exemplos são: carbono, aramida, vidro, nylon e fibras naturais à base de celulose. Entre todas as fibras sintéticas, a fibra de vidro é a mais utilizada devido ao seu baixo custo e às propriedades físico-mecânicas comparativamente melhores (KHAN et al., 2010). Fibras de vidro estão entre os materiais industriais mais versáteis hoje conhecidos. Eles são facilmente produzidos a partir de matérias-primas disponíveis em suprimentos praticamente ilimitados (LOEWENSTEIN, 1973). O vidro pode ser amplamente definido como um sólido amorfo. A rigor, um material amorfo implica em um arranjo aleatório de átomos, a ausência de qualquer simetria periódica ou a ausência de qualquer estrutura cristalina (HUMMEL, 2011). Muitas composições diferentes de vidros minerais são usadas para produzir fibras de vidro. Os mais comuns são baseados em sílica com adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio. O E glass (electrical) é a fibra de vidro mais usada não só por possuir boas propriedades mecânicas, baixa condutividade elétrica e resistência à intempéries, mas também devido ao baixo custo de produção. A fase de reforço é crucial para o projeto de componentes fabricados em material compósito reforçados por fibras. A influência do reforço é controlada pelo comprimento da fibra, orientação e a fração volumétrica (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Quanto ao comprimento, fibras longas são mais efetivas do que fibras curtas, visto que transmitem o carregamento melhor através da matriz e são menos propensas a sofrer arrancamento da matriz por cisalhamento da interface fibra-matriz (KALPAKJIAN; SCHMID, 2006). A adesão interfacial fibra/matriz também é um parâmetro muito importante na tenacidade de um material compósito, o controle da interação interfacial pode resultar em propriedades mecânicas melhores (JOSEPH; JOSEPH; THOMAS, 2002).

### 2.1.3 Resina ester vinílica como matriz polimérica

Compósitos de resina ester vinílica reforçados com fibra de vidro são amplamente utilizados para a produção de navios, tubulações e estruturas para aplicações em ambiente marinho (GELLERT; TURLEY, 1999). Se tratando de compósito reforçado por fibras, a matriz une as fibras e age como um meio pelo qual a tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída às fibras, apenas uma pequena porção da carga aplicada é sustentada pela matriz. Além disso, a matriz protege as fibras individuais de danos superficiais resultantes de abrasão ou reações químicas com o meio ambiente. Por fim, a matriz separa as fibras e, em virtude de sua plasticidade, impede a propagação de trincas frágeis de fibra para fibra. Em outras palavras, a matriz serve como uma barreira para a propagação da trinca, isto é, mesmo que algumas das fibras falhem individualmente, a fratura total não ocorrerá até que um número significativo de fibras adjacentes falhe e forme um agrupamento de tamanho crítico (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Polímeros termofixos, também conhecidos por termorrígidos ou termoestáveis, são polímeros de rede que se tornam permanentemente duros durante a sua formação e não amolecem até a sua temperatura de deflexão térmica (*HDT*). A *HDT* é temperatura a partir da qual um material apresenta um decréscimo em suas propriedades mecânicas. De acordo com Richardson e Lokensgard (2004) a *HDT* serve de limite operacional para componentes estruturais, sendo a máxima temperatura contínua de operação que um material pode suportar. Os polímeros termofixos são resultados da reticulação polimérica, um processo que ocorre quando cadeias poliméricas lineares ou ramificadas são interligadas por ligações covalentes. Essa interação é chamada de cross-linking ou ligação cruzada e gera um material com organização molecular tridimensional com alta massa molar. Essa configuração restringe o deslizamento das longas cadeias poliméricas e torna a estrutura mais rígida (DODIUK; GOODMAN, 2013). As propriedades mecânicas finais do polímero dependem das unidades moleculares que constituem a rede e também do comprimento e densidade das ligações cruzadas (HULL; CLYNE, 1996).

### 2.1.4 Filament Winding

O filament winding é uma das mais antigas técnicas de fabricação de materiais compósitos. Ao longo de sua história, o processo de produção tem sido utilizado principalmente para a fabricação de formas rotativas aplicando o princípio de torneamento (MILEWSKI; ROSATO, 1981). As fibras, quer como fios individuais ou como *rovings*, são puxadas através de um banho de resina por tensionadores mecânicos. De acordo com (MILEWSKI; ROSATO, 1981), a tensão aplicada nos *rovings* durante o processo de filament winding pode alterar significativamente o desempenho mecânico da estrutura resultante. Na saída do recipiente com resina, os *rovings* são enrolados em um mandril sob revolução. Uma vez que o número de camadas estruturais é atingido, a resina é curada de acordo com suas respectivas particularidades. Com sistemas de controle de alta precisão, as fibras impregnadas podem ser fixadas de modo que elas sejam orientadas com diferentes ângulos de enleamento. Tal fato permite otimizar o desempenho mecânico de um componente somente com o estudo entre as condições de carregamento e o

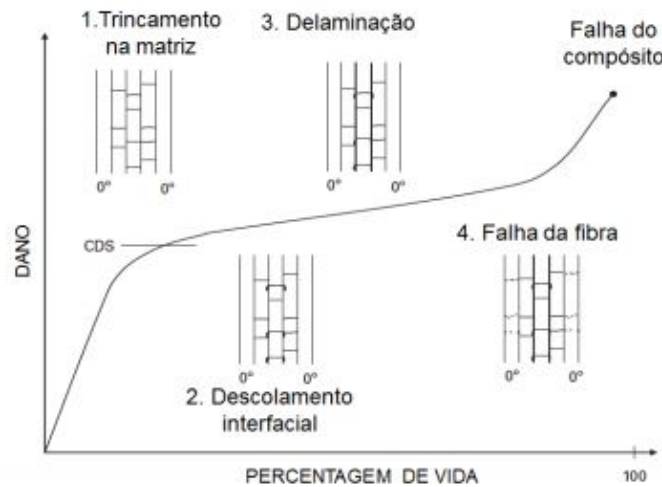
ângulo de enleamento. Os parâmetros chave para o projeto de componentes em filament winding são a tensão na fibra, a eficiência de absorção da resina e a geometria de enrolamento (OWEN; MIDDLETON; JONES, 2000).

### **2.1.5 Mecanismos de dano em materiais compósitos**

A microestrutura heterogênea, a grande diferença entre as propriedades dos constituintes, a presença de interfaces, bem como a direcionalidade do reforço - que induz a anisotropia nas propriedades gerais, são as razões para a complexidade observada nos mecanismos de falha materiais em compósitos. Dano refere-se ao conjunto de todas as alterações irreversíveis ocasionadas em um material, por um conjunto de processos, físicos ou químicos, dissipadores de energia, resultantes da aplicação de cargas termomecânicas (TALREJA; SINGH, 2012).

Os principais mecanismos de danos em compósitos incluem o trincamento da matriz, o descolamento na interface fibra/matriz (*debonding*), o deslocamento de laminas adjacentes (delaminação) e a ruptura da fibra de reforço. O processo de dano é sempre conduzido pelo mesmo processo: o primeiro dano que ocorre requer baixo consumo de energia (falha de interface ou matriz), enquanto os últimos estágios (rompimento de fibra) requerem nível de energia mais significativo (DYER; ISAAC, 1998). Uma descrição esquemática do desenvolvimento de danos em laminados compósitos submetidos à tensão é apresentado na Figura 2. No estágio inicial da acumulação de dano, o trincamento de matriz é o mecanismo dominante nas camadas onde as fibras estão inclinadas em relação a direção principal de aplicação do carregamento. O trincamento transversal da matriz inicia a partir de defeitos como vazios, áreas com alta proporção de fibra ou áreas ricas em resinas. Essas trincas crescem de forma instável e uniforme ao longo da espesura das camadas.

Figura 2: Danos em compósito em função da vida em fadiga percentual.



**Figura 4** – Danos em compósito em função da percentagem de vida em fadiga. Adaptado de [21].

Fonte: Talreja, 2012

O trincamento de matriz não constitui por si só um perigo para a integridade da estrutura, o dano é relativamente pequeno e ocorre entre 10-25 % da vida útil do componente. Embora a perda de resistência seja insignificante e a perda de rigidez seja inferior a 10%, as trincas na matriz são os precursores para danos subsequentes (CAMPBELL, 2012). Esta evolução progressiva do dano é subcrítica por um tempo, mas eventualmente leva à falha final do componente. O monitoramento da ocorrência e evolução de danos subcríticos em um material compósito é um dos principais objetivos da avaliação de integridade estrutural para essa classe de materiais (GIURGIUTIU, 2015). O processo de trincamento continua até que as trincas em cada camada tenham atingido um equilíbrio ou espaçamento de saturação. A medida que o espaçamento entre trincas começa a diminuir, as trincas vizinhas começam a interagir entre si gerando uma redistribuição nas tensões. Trincas próximas começam a produzir o chamado *shield effect*, que tende a reduzir as tensões entre as respectivas trincas. Portanto, no carregamento posterior, a taxa de trincamento reduz e finalmente se aproxima de um valor de saturação. Assim, uma curva típica de crescimento de dano em materiais compósitos consiste em três estágios: início das trincas transversais, aumento rápido na densidade de trincas transversais e redução da taxa de evolução da densidade de trincas até a saturação (TALREJA; SINGH, 2012). Essa saturação recebe o nome de estado característico de dano (*CDS - Characteristic Damage State*). De acordo com (REIFSNIDER, 1980), esse acúmulo de dano inicial em camadas de um compósito laminado apresenta um comportamento assintótico. De acordo com Ogini, Smith e Beaumont (1985), a rigidez cai gradualmente conforme a densidade de trincas transversais aumenta durante o carregamento cíclico. A rigidez é uma das propriedades mais importantes das estruturas do tubo PRFV, pois representa boa parte da estabilidade do tubo em serviço (ZHU et al., 2020).

O carregamento subsequente causa o início de trincas transversais às trincas primárias. Essas trincas, conhecidas como trincas secundárias, são pequenas e podem causar descolamento interfacial, e assim iniciando trincas interlaminares. No caso de um compósito laminado, além do dano intralaminar, ocorre o dano interlaminar denominado delaminação. Quando rachaduras se desenvolvem em uma camada, a propagação é interrompida pelas camadas adjacentes. Na ponta da trinca intralaminar, as singularidades das tensões fazem com que as trincas se propaguem na interface entre duas camadas adjacentes. No caso de um compósito laminado com camadas de diferentes direções, a delaminação também pode iniciar devido às diferenças de rigidez das diferentes camadas que formam o laminado (JOLLIVET; PEYRAC; LEFEBVRE, 2013). O desenvolvimento posterior de danos é demasiadamente localizado, aumentando de forma instável e envolvendo extenso rompimento da fibra. O evento de falha final é manifestado pela formação de um caminho de danos através das regiões localmente afetada e, portanto, trata-se de um processo altamente estocástico (TALREJA; SINGH, 2012).

### 2.1.6 Classes de simetrias

As relações constitutivas são particulares para cada material (ou classe de materiais) e servem para distinguir e classificar os diversos materiais existentes conforme suas propriedades mecânicas. As equações constitutivas mecânicas relacionam as tensões com alguma medida do movimento do corpo, normalmente a deformação ou a taxa de deformação (variação da deformação com o tempo).

Grandezas que requerem a descrição de magnitude e de duas direções são chamadas de tensores de segunda ordem, como por exemplo o tensor tensão, que requer informação da força e da superfície onde esta atua. Qualquer meio linear elástico é definido em termos de seu tensor elástico, o qual possui características de simetria intrínsecas resultantes da teoria da elasticidade, devido as condições de simetria dos tensores de tensão e deformação.

Heterogeneidade e anisotropia são conceitos importantes para o estudo de materiais compósitos, materiais homogêneos são aqueles que possuem as mesmas propriedades em qualquer ponto do corpo. Em materiais não homogêneos as propriedades são funções da posição. Isto não pode ser confundido com isotropia, que significa que o material, em um ponto, mantém as suas propriedades em todas as direções.

A elasticidade é um modelo constitutivo que parte de hipótese de que um corpo, inicialmente em um estado de referência, sofre a ação de forças externas. Após a aplicação destas forças, o corpo se deforma até um estado final, por onde irá permanecer até que as forças sejam retiradas. Uma vez retiradas estas forças o corpo retorna a posição original, de modo que nenhuma parcela do trabalho externo aplicado sobre o corpo se dissipe.

O tensor de elasticidade  $c$ , a partir da Lei de Hooke generalizada Equação 1, relaciona os tensores de segunda ordem de tensão e de deformação, logo podemos concluir que o tensor  $c$  é de quarta ordem. Considerando que o tensor de tensão e o de deformação são simétricos, o tensor  $c$  possui 36 constantes materiais a serem determinadas para um problema tridimensional.

O número de constantes elásticas independentes entre si depende basicamente do número de direções elasticamente equivalentes que podem ser traçadas a partir de um ponto no interior do sólido em estudo. Para o caso mais geral de anisotropia, não há quaisquer duas direções equivalentes. No entanto, para determinadas classes de simetria a relação constitutiva expressa pelo tensor  $c$  pode ser simplificada, quanto maior o grau de simetria de um meio mais simples será a matriz constitutiva. As direções elasticamente equivalentes são o resultado de simetria na estrutura do material e portanto os vários tipos de anisotropia possíveis podem ser classificados conforme o tipo de simetria existente.

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (1)$$

A classe de simetria transversalmente isotrópica comumente está ligada a tubulações produzidas por meio do enrolamento filamentar (SILVA, 2008), a geometria de interesse desta dissertação, onde o plano de simetria ocorre no eixo  $z$ , colinear ao eixo longitudinal do duto. No caso de um meio transversalmente isotrópico, cinco constantes são necessárias para descrevê-lo completamente (NAYFEH, 1995). Este tipo de anisotropia pode ser associado a material fino acamadado, ou seja, camadas horizontais pouco espessas (BACKUS, 1962), e/ou estruturas onde partículas individuais são alinhadas em uma direção preferencial reduzindo a matriz constitutiva para apenas 5 constantes independentes, podendo ser expressa como:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{11} - 2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} - 2C_{66} & C_{22} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 2.2 Ensaios não destrutivos para materiais compósitos

A microestrutura heterogênea e a grande anisotropia são as razões para a grande complexidade dos mecanismos de falha em materiais compósitos. Como consequência disso, a detecção de defeitos e avaliação da integridade estrutural são particularmente desafiadoras para métodos acústicos. Portanto, o desenvolvimento de métodos de ensaios não destrutivos robustos e confiáveis são essenciais para aumentar a segurança operacional, reduzir fatores de segurança e otimizar o calendário de manutenção e reparo de componentes fabricados em materiais compósitos. De acordo com a revisão da literatura, existem muitos tipos de inspeções para avaliar materiais compósitos e diversos métodos propostos por pesquisadores para cada um deles. De acordo com Wang et al. (2020), inúmeras técnicas de inspeção são utilizadas em compósitos no campo dos ensaios não destrutivos, incluindo ultrassom convencional, termografia, radiografia, inspeção visual, emissão acústica, líquidos penetrantes entre outros. Estudos descobriram que os melhores



métodos para determinação das propriedades elásticas são os métodos de ultrassom (ROJEK; STABIK; WRABEL, 2005). Já os autores El-Sabbagh, Steuernagel e Ziegmann (2013) estudaram a viabilidade do uso de uma onda sonora longitudinal ultrassônica na definição da fração de volumétrica e da distribuição na fibra natural em materiais compósitos. Quanto a análise da onda sonora, as propriedades mais comumente utilizadas são a velocidade de propagação da onda e a perda de amplitude (ou energia) do sinal. Conforme Karabutov e Podymova (2014), a maioria das aplicações considera apenas a velocidade do pulso e a relaciona a diferentes parâmetros, no entanto a perda de energia pode fornecer informações adicionais sobre o comportamento da onda no material. Além disso, alguns autores estudaram as consequências da atenuação de pulso (GENOVES et al., 2015; LEINOV; LOWE; CAWLEY, 2015; CHENG et al., 2012).

## 2.2.1 Extensometria de resistência elétrica

### 2.2.1.1 Princípio físico

Um fio metálico muda sua resistência quando submetido a deformações. Esse fenômeno foi descoberto em 1856 pelo Lord Kelvin que publicou pela primeira vez a relação entre deformação e resistência em fios condutores de corrente elétrica. No entanto, somente em meados de 1930 que Arthur Claude Ruge aplicou o conhecimento desse fenômeno para medir deformações. O ERE é um transdutor sensível que transforma pequenas variações de resistência elétrica em deformação. Basicamente, o sensor converte variações de dimensão da sua grade metálica em variações equivalentes de sua resistência elétrica (MUFTAH; HARIS, 2011). Fundamentalmente, todos os medidores de deformação são projetados para converter o movimento mecânico em um sinal elétrico. Este sinal pode, posteriormente, ser amplificado e medido, tornando possível calcular a quantidade de deformação imposta ao sensor. O principal componente de um ERE é o fio metálico e condutor que, usualmente, possui aproximadamente 0,001 mm de diâmetro e forma a grade do sensor. Tal grade é colada a uma fina lâmina, chamada de base, que estará em contato com a peça a ser deformada, a base possui de 20 e 25  $\mu\text{m}$ . Os materiais utilizados para fabricação da base geralmente são poliamida e epóxi, no entanto outros materiais são utilizados para aplicações mais específicas. O formato da grade normalmente é produzido por um processo de gravação fotoquímica. Com o intuito de preservar a integridade do fio metálico, há uma lâmina de resina que atua como uma camada de proteção para o grid, essa cobertura possui aproximadamente 12  $\mu\text{m}$  de espessura. A sensibilidade de um instrumento de medida é definida como a mudança do valor da variável de saída de um dispositivo de medição em relação à mudança causal da variável de entrada (DIN, 1995). O sinal de entrada do ERE é a deformação registrada e o sinal de saída é a variação da resistência, causada pela deformação. Essa relação chama-se *Gage Factor*, cuja formulação matemática segue a equação 3.

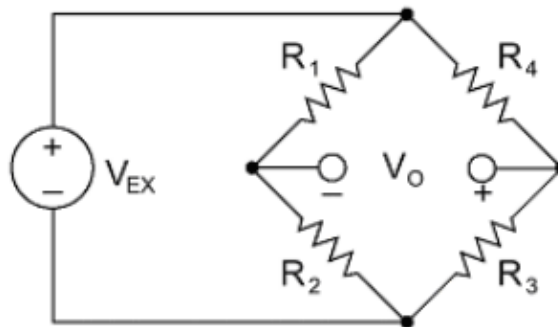
$$\kappa_G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (3)$$

Onde  $\kappa_G$  é *Gage Factor*,  $\Delta R/R$  é a variação da resistência e  $\varepsilon$  é a variação da deforma-

ção.

Os filamentos metálicos são montados em bases de materiais selecionados para aplicações específicas para os quais os extensômetros são destinados (MURRAY; MILLER, 1992). Constantan é a liga metálica mais usada para a fabricação da grade, essa liga consiste em 55% cobre e 45% níquel, mas a porcentagem pode variar em até 5% (KEIL, 2017). A ponte de *Wheatstone* é um esquema de montagem de elementos elétricos que permite a medição do valor de uma resistência elétrica desconhecida. Essa ponte pode ser usada de diversas maneiras para medições de resistência elétrica, desde determinar o valor absoluto de uma resistência pela comparação com uma resistência conhecida até determinar mudanças relativas na resistência. A grande vantagem do emprego da ponte de *Wheatstone* em ERE é permitir que uma pequena variação na resistência seja medida com grande acuracidade. Uma ponte de *Wheatstone* genérica, como ilustrada na Figura 3, é formada por quatro braços resistivos e uma tensão de excitação,  $V_{ex}$ , aplicada na ponte.

Figura 3: Ponte de *Wheatstone* genérica.



Fonte: Adaptado de Hoffmann, 1978

A ponte de *Wheatstone* é o equivalente de dois circuitos divisores de tensão em paralelo.  $R_1$  e  $R_2$  formam um circuito divisor de tensão;  $R_4$  e  $R_3$  formam o segundo circuito divisor de tensão. A saída da ponte de *Wheatstone*,  $V_o$ , é medida entre os nós médios desses dois divisores de tensão. Quando  $R_1/R_2 = R_3/R_4$  a saída de tensão  $V_o$  é igual a zero, essas condições, dizemos que a ponte está balanceada. Qualquer variação da resistência de qualquer um dos braços resultará em uma tensão de saída diferente de zero. Assim, podemos substituir  $R_4$  por um ERE ativo e qualquer variação na resistência do ERE irá desequilibrar a ponte e produzir uma tensão de saída que será função do valor de deformação. As deformações medidas por um ERE normalmente são muito pequenas. Consequentemente, as mudanças de resistência também são muito pequenas e não podem ser medidas diretamente com um ohmímetro. Primeiramente, ocorre o carregamento mecânico do corpo de prova devidamente instrumentado com o ERE. Após, temos o ERE que faz a conversão da deformação mecânica em variação na resistência elétrica e fica posicionado em um dos braços da ponte de *Wheatstone*. Para isso, energia elétrica precisa ser fornecida conjunto ERE e sistema de medição, essa energia é proveniente de uma fonte separada,

geralmente uma voltagem constante é usada, no entanto uma corrente constante também pode ser utilizada. Um amplificador é colocado no sistema de medição para amplificar a tensão de saída da ponte para um nível adequado para os instrumentos de leitura. O último componente do sistema de medição é responsável por converter o sinal de saída amplificado da ponte de Wheatstone para uma forma que o ser humano consiga observar, chama-se esse componente de visor. O visor pode ser desde um amperímetro ou voltímetro até um sistema de aquisição de dados que grava todas variações de resistência durante um ensaio.

### *2.2.1.2 Extensometria de resistência elétrica como ensaio não destrutivo*

Desde 1940, os extensômetros de resistência elétrica (ERE) exemplificam a ferramenta mais poderosa no que diz respeito à avaliação experimental de tensões, ainda hoje representando uma escolha comum para monitorar deformações de materiais e danos em materiais compósitos em serviço. Esse tipo de sensor é utilizado nas mais diversas aplicações, tais como: sensores de aceleração, vibração, acústicos e pressão (MIDDELHOEK et al., 1995). A princípio todos extensômetros de resistência elétrica podem ser usados para solução de problemas experimentais de análises de tensões e para construção de transdutores. Existem, no entanto, certas diferenças entre os tipos de extensômetros, tornando-os adequados para aplicações específicas (HOFFMANN, 1989). Há ERE disponíveis no mercado de variadas formas e tamanhos, a correta seleção pode prevenir erros que implicam em aumento do custo da instrumentação e a obtenção de resultados não satisfatórios ou até mesmo errôneos. Para esses sensores, o ambiente de operação é um parâmetro crucial que deve ser considerado durante a seleção do sensor e do revestimento protetor. Devido à sua superfície de aplicação relativamente alta e à necessidade desses revestimentos de proteção, os ERE encontram muitas dificuldades na aceitação para aplicação em componentes de grande escala. A principal desvantagem de tal abordagem é dada por sua limitação de superfície de monitoramento, de modo que uma grande quantidade de sensores seria necessária para monitorar a estrutura, resultando em uma rede complexa com muitos fios e cabos. Por este motivo, a localização dos medidores de tensão muitas vezes é otimizada para as áreas mais crítica. Segundo Murray e Miller (1992), a análise experimental de deformações é uma ferramenta importante no projeto, desenvolvimento e monitoramento global de estruturas e máquinas. Com preparação de superfície e escolha de adesivo adequada, os ERE podem ser usados na maioria dos materiais, como por exemplo, metais, vidro, madeira e polímeros.

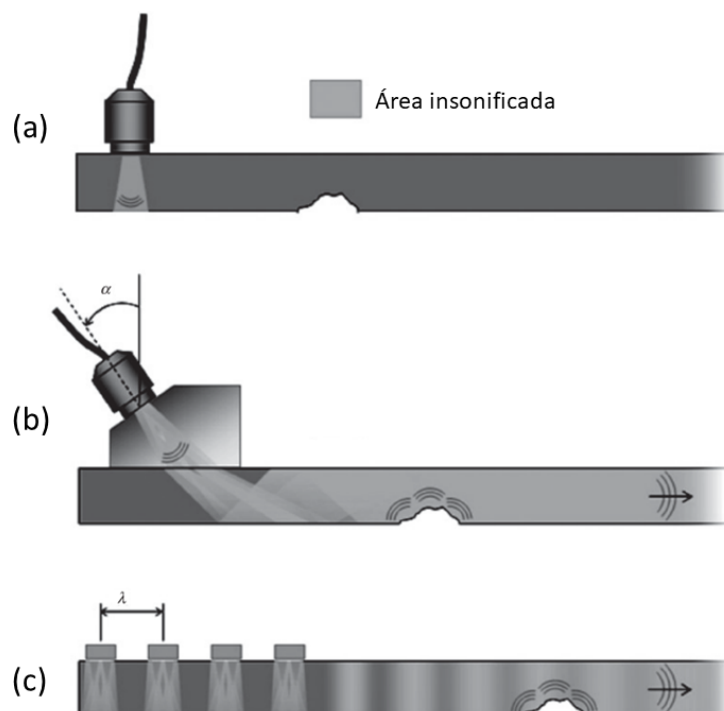
### **2.2.2 Métodos acústicos**

Em geral, o uso de ondas ultrassônicas está bem estabelecido na indústria de ensaios não destrutivos. A maioria dos testes utilizados para localização de defeitos envolve a excitação de uma onda volumétrica no material. Industrialmente, o ultrassom convencional é mais utilizado que a técnica de ondas guiadas não somente pela maior facilidade de interpretação dos dados obtidos, mas também devido a maior facilidade de uso por parte do inspetor. Para materiais

isotrópicos, apenas dois tipos de ondas podem propagar, a onda cisalhante e a onda longitudinal, e suas velocidades são constantes em relação a frequência. Ondas volumétricas e ondas guiadas se comportam de maneira diferente, mas na verdade são governadas pelo mesmo conjunto de equações de ondas diferenciais parciais. A diferença na solução matemática dos dois tipos de ondas deve-se às condições de contorno. Em contraste, as ondas guiadas são o resultado da interação que ocorre na interface entre dois materiais diferentes. Esta interação produz reflexão, refração e conversão de modo entre ondas longitudinais e de cisalhamento que podem ser previstas usando condições de contorno apropriadas (DEMMA, 2003).

Uma breve comparação da inspeção ultrassônica de onda volumétrica e de onda guiada é ilustrada na Figura 4, a Figura 4 (a) exibe a avaliação por ultrassom convencional volumétrico com excitação de feixe normal a superfície de inspeção, a Figura 4 (b) apresenta a inspeção por ondas guiadas com ângulo de excitação e na Figura 4 (c) é representado o método de ondas guiadas com arranjo periódico de elementos piezoelétricos.

Figura 4: Comparação entre onda volumétrica e dois métodos de ondas guiadas.



Fonte: Adaptado de (ROSE, 2014)

A Figura 4 permite, ainda, verificar que a técnica de ondas guiadas permite maior cobertura da extensão de uma estrutura em comparação com ultrassom volumétrico. Além disso, na inspeção de onda volumétrica, o transdutor deve ser movido ao longo da superfície para coletar dados, enquanto com ondas guiadas a estrutura pode ser inspecionada a partir de uma única posição da sonda. A principal dificuldade da aplicação das ondas guiadas vem da complexidade da solução das equações que regem o problema (ROSE, 2014). Como resultado dessa solução observa-se que as ondas guiadas são extremamente dependentes do comprimento de onda e da frequência,

sendo que a propagação de um modo de onda guiada depende de uma dada combinação de geometria, número de onda e frequência.

### 2.2.2.1 *Ultrassom convencional*

Para ultrassom convencional sabemos que a velocidade de fase e a velocidade de grupo são constantes e iguais. Sendo assim, sabendo a velocidade ( $v$ ) de propagação da onda ultrassônica no meio inspecionado e a frequência ( $f$ ) utilizada, podemos calcular o comprimento de onda ( $\lambda$ ) utilizando a equação 4.

$$v = \lambda \times f \quad (4)$$

Outra importante propriedade para o método de ultrassom é a impedância acústica de um material, cuja definição é a resistência ou dificuldade que o material opõe-se à passagem do som. Quando as ondas sonoras atravessam uma interface entre dois materiais diferentes, se eles possuírem a mesma impedância acústica, não ocorre reflexão e a onda é transmitida integralmente ao material receptor. Caso exista diferença de impedância acústica entre os meios, ocorrerá variação na reflexão das ondas sonoras. Esta diferença de impedância estará diretamente relacionada na energia que será refletida na interface dos meios em questão. A impedância acústica pode ser calculada por meio da Equação 5, cujo os parâmetros são: impedância acústica do meio ( $Z$ ), densidade do meio ( $\rho$ ) e velocidade de propagação da onda no meio ( $V$ ).

$$Z = \rho \times V \quad (5)$$

A velocidade e as taxas nas quais a amplitude de uma onda diminuem à medida que ela se propaga são constantes e são características dependentes do meio em que a onda está se propagando. A intensidade de um feixe ultrassônico que é detectado por um transdutor receptor é consideravelmente menor do que a intensidade da transmissão inicial, visto que uma onda acústica ao propagar-se num determinado meio sofre um decaimento que está relacionado com diversos tipos de mecanismos físicos. Esses mecanismos podem, no entanto, ser divididos em duas categorias: absorção (perdas no meio) e dispersão (perdas em fronteiras) (SANTOS, 2004). Quando as ondas sonoras interagem com os limites do meio, enfrentam reflexão, transmissão e espalhamento sonoro (ENSMINGER; BOND, 2011). Essas características de espalhamento, a velocidade da onda sonora e o tempo de voo podem fornecer informações valiosas sobre as propriedades e, possivelmente, a integridade do material. No entanto, o uso de métodos ultrassônicos convencionais para inspeção de compósitos pode ser um desafio devido à natureza anisotrópica das estruturas dos compósitos. Para materiais metálicos, a dispersão do feixe é altamente dependente da relação entre o tamanho do grão e o comprimento de onda ultrassônico. Para materiais compósito, quando as ondas ultrassônicas se propagam, a atenuação geral é uma soma da viscosidade da matriz, atenuação devido ao espalhamento do feixe causado por descontinuidades/defeitos e perda de energia na interface fibra/matriz. Há estudos em relação

a atenuação em materiais compósitos laminados como o trabalho de Karabutov e Podymova (2014), cujos autores investigaram a variação da atenuação ultrassônica devido a fração de vazios em materiais compósitos em diferentes frequências de ondas incidentes. Já os autores (LIU; OSWALD; BELYTSCHKO, 2013) usaram o método de elementos finitos para estudar a influência da orientação da fibra em diferentes frequência de emissão nas características de atenuação em compósitos.

Motivados pela utilização da técnica de *SONAR - Sound Navigation and Ranging* - durante a segunda guerra mundial - em 1934, o primeiro equipamento de ultrassom pulso-eco para detecção de falhas em materiais metálicos foi desenvolvido por (SOKOLOV, 1935). Um único cristal de quartzo foi utilizado, o qual alternava entre emissão e recepção (WOLOSHYN, 1963). Os ensaios não destrutivos são amplamente utilizados na indústria, principalmente no processo de avaliação de integridade de componentes estruturais, visando identificar discontinuidades, corrosão e falhas ou imperfeições devido a processos de soldagem e união dos materiais. Assim, a técnica de ultrassom, consolida-se, atualmente, conforme citam (MAYWORM; COSTA-FELIX; ALVARENGA, 2017), como uma das principais ferramentas de controle da qualidade. Por apresentar sensibilidade relativamente alta a defeitos presentes na estrutura do material, além de ser um ensaio com fácil operação e alta abrangência de aplicações, os ensaios ultrassônicos são métodos não destrutivos amplamente utilizados (BRAGA, 2009). O ultrassom também é comumente aplicado para a medida de espessura de materiais, como dutos e chapas, a fim de detectar alterações causadas, por exemplo, pela corrosão (WALL; WADSÖ, 2013). Os ensaios de ultrassom também vem sendo muito utilizados para a determinação das propriedades mecânicas de materiais compósitos a partir das velocidades ultrassônicas medidas. Existem trabalhos que apresentam técnicas de transmissão direta (utilizando um par de transdutores) e pulso-eco (utilizando um transdutor) em tanque com água para determinar a constante elástica de materiais compósitos de fibra de vidro com matriz epóxi (BOERI, 2006). Para possibilitar o monitoramento de tubulações quanto às possíveis degradações ocasionadas pelo fluido transportado ou pelas condições operacionais, é necessário desenvolver um método para inspecionar o envelhecimento e perda de propriedades de certos pontos do duto. Portanto, devem ser definidos pontos no tubo para serem inspecionados e após isso utilizar o procedimento de inspeção e monitoramento do envelhecimento de material de tubulações e equipamentos em PRFV, pela técnica de ultrassom. A ASTM-C597 (ASTM, 2009) define o procedimento de determinação da velocidade longitudinal em materiais compósitos. O módulo de elasticidade pode ser determinado a partir de cálculos baseados nas velocidades do som medidas no material e da sua densidade. Quando sabemos a espessura do material a própria peça será o bloco de referência, com isso pode se medir a velocidade sônica considerando o tempo percorrido pelo som, entre o primeiro e o segundo eco de fundo. A velocidade do som no material será definida ajustando-se a distância entre o primeiro e o segundo eco de fundo, na espessura conhecida.

### 2.2.2.2 Ondas guiadas

As técnicas de ondas guiadas usando sensores piezoelétricos estão entre as mais populares quando falamos de sistemas de monitoramento da integridade estrutural atualmente (RADZI-ENSKI et al., 2019). No entanto, existem poucos estudos em cima de ondas guiadas em materiais compósitos, ondas guiadas em meios anisotrópicos tanto do ponto de vista físico quanto de ensaios não destrutivos. Essas técnicas são atrativas porque as ondas guiadas, definidas como ondas elásticas confinadas pelos limites de uma estrutura, podem percorrer longas distâncias com pouca atenuação e com alta sensibilidade a pequenos danos estruturais (LOWE; ALLEYNE; CAWLEY, 1997). A técnica de ondas guiadas por ultrassom está revolucionando a abordagem de testes não destrutivos e monitoramento de integridade estrutural, visto que a inspeção de grandes áreas a partir de uma única posição do sensor é possível, mesmo para estruturas ocultas e revestidas. Ademais, existem enormes oportunidades de aplicação da técnica de ondas guiadas por causa da centena de combinações entre modos e frequências que estão disponíveis para determinadas guias de onda (ROSE, 2014). A fundamentação física para a propagação de ondas está ligada com a interação de átomos discretizados em um sólido. Os átomos que formam o meio material oscilam em torno de sua posição de equilíbrio quando o respectivo meio material é submetido a uma perturbação. Sendo assim, quando as partículas de um meio são deslocadas das suas posições de equilíbrio, forças internas restauradoras surgem. Essas forças restauradoras elásticas, combinadas com a inércia das partículas, levam aos movimentos oscilatórios (vibrações) do meio (AULD, 1973). Logo, ao prever a base para a propagação de uma perturbação é útil considerar primeiro um modelo composto de elementos discretos consistindo de uma série de massas e molas interconectadas (GRAFF, 1975). No estudo da acústica, considera-se que o material é formado por pequenas partículas, mas cada partícula contém vários átomos que se movimentam em unissonância. Assim, a acústica pode ser considerada um fenômeno macroscópico onde a matéria é modelada como um meio contínuo. A interação entre essas quantidades é representada matematicamente pela combinação de elementos diferenciais, ao invés de um simples movimento *push-pull* ao longo de uma série de molas; ou seja, a perturbação se espalha de forma tridimensional. O estudo da propagação de ondas em meio infinito é de grande valor para o entendimento da transferência de energia por movimento ondulatório em um meio elástico (AULD, 1973).

O que define a geração de ondas volumétricas ou de ondas guiadas é a relação entre o comprimento de onda e a dimensão característica da estrutura que guia a onda. A relação entre esses dois parâmetros é tão intrinsecamente ligada que é comumente utilizada para parametrizar o comportamento da onda guiada em um determinado guia (WILCOX, 2009). Essas relações acabam gerando um fenômeno conhecido como dispersão, a dispersão é a variação da velocidade de propagação da onda com respeito a alguma variável, no caso das ondas guiadas a variação de velocidade é função da frequência (ROSE, 2014). A dispersão acaba provocando ainda outro fenômeno não visto no ultrassom convencional, a distinção entre velocidades, a velocidade de fase e velocidade de grupo (ROYER; DIEULESAINT, 1999). Para ondas guiadas, observa-se que

o resultado é fortemente dependente da frequência e dos ângulos de propagação da onda incidente dentro da estrutura e que o complexo fenômeno de interferência possui grande impacto nos resultados obtidos. Os resultados onde há forte sobreposição construtiva são, na verdade, pontos da solução equação da onda mecânica na curva de dispersão da velocidade de fase. Em outros lugares, há um forte cancelamento pela interferência destrutiva (ROSE, 2014). A velocidade do grupo é a velocidade na qual um pacote de onda guiada viajará em uma determinada frequência, enquanto a velocidade de fase é a velocidade na qual os picos individuais dentro desse pacote viajam (DEMMA, 2003).

Deriváveis da velocidade de fase, curvas de dispersão são conjuntos de curvas de dispersão da velocidade de grupo. Os valores das curvas de dispersão da velocidade de grupo dependem dos valores de ordenada e inclinação das curvas de dispersão da velocidade de fase. A velocidade do grupo é definida como a velocidade medida em um guia de onda de um pacote de ondas de frequência semelhante. Esta velocidade de grupo é o que você realmente mede em um experimento. Todos os problemas de ondas guiadas têm associado a eles o desenvolvimento de curvas de dispersão apropriadas e estruturas de ondas correspondentes. De milhares de pontos em uma curva de dispersão, apenas alguns levam a uma inspeção bem-sucedida, ou seja, aqueles com maior poder de penetração, deslocamento máximo na superfície externa, central ou interna, com apenas vibração plana na superfície para evitar vazamento em um fluido, ou com potência mínima em uma interface entre um tubo e um revestimento, etc (ROSE, 2014).

Ao longo das últimas décadas, conforme o conhecimento das ondas elásticas se tornou mais bem estabelecido, o potencial dessas ondas na identificação de danos foi trazido à atenção e novas técnicas de identificação de danos foram desenvolvidas (TORKAMANI et al., 2014). Entre as inúmeras abordagens tradicionais de avaliação não destrutiva baseadas em ondas elásticas, as ondas guiadas provavelmente foram a abordagem mais favorecida pelos pesquisadores devido a múltiplas vantagens, tais como: custo-benefício, capacidade de inspecionar grandes estruturas com menos transdutores, a capacidade de examinar toda a área transversal da estrutura para detectar defeitos superficiais e internos, a capacidade potencial de classificar os tipos de danos usando diferentes modos de onda, alta sensibilidade a defeitos de fabricação e danos em serviço, a possibilidade de inspecionar componentes revestido ou estruturas isoladas, como dutos subterrâneos, e uso em detecção automatizada de danos e técnicas de SHM (SU; YE, 2009). Além disso, as ondas guiadas são significativamente suscetíveis a interferências estruturais e materiais causadas por danos, defeitos e bordas. Permitem a inspeção e monitoramento de ampla área, mesmo que o material investigado seja caracterizado por uma alta taxa de atenuação; eles mostram a capacidade de viajar por longas distâncias com baixo consumo de energia também (DE LUCA et al., 2020).

Ondas guiadas, de fato, fornecem indicação qualitativa da ocorrência de danos (FENZA; SORRENTINO; VITIELLO, 2015) (SU; YE; LU, 2006) (SORRENTINO; FENZA, 2016). Além disso, as informações sobre o estado de dano da estrutura permitem estimar sua vida útil residual (ASHFORTH; ILCEWICZ, 2017) (TALREJA; PHAN, 2019) (MANSON; WORDEN;



ALLMAN, 2003) e, conseqüentemente, melhorar a eficácia das operações de manutenção, bem como reduzir os fatores de segurança a serem aplicados durante o projeto de engenharia.

### 2.2.2.3 Índices de dano aplicado à ondas guiadas

Em técnicas convencionais de ondas guiadas, o dano estrutural é frequentemente identificado pela comparação entre os dados de linha de base obtidos da condição original da estrutura e os dados "danificados" medidos a partir do estado atual da estrutura alvo (AN; KIM; SOHN, 2014). No entanto, a abordagem com índices de dano é projetada para superar a complexidade dos sinais na presença de danos e baseia-se no fato de que as propriedades dinâmicas de uma estrutura mudam com o início de novos danos ou o crescimento de danos existentes (FENZA; SORRENTINO; VITIELLO, 2015).

Se uma relação pode ser estabelecida entre a mudança em alguma característica da forma de onda extraída e algum parâmetro de dano conhecidos, isso é chamado de índice de dano. Essencialmente, existem três tipos de índices de danos: domínio do tempo, domínio da frequência e domínio conjunto do tempo e frequência. Vários índices de dano no domínio do tempo são usados na literatura (QING et al., 2006) (MICHAELS; MICHAELS, 2007).

A definição de índice de dano para um determinado caminho  $ij$  entre os PZTs  $i$  e  $j$ , o índice de dano  $DI$  é um valor determinado a partir da comparação de duas variáveis  $X_1$  e  $X_2$ , resultante da aplicação de uma dada função :

$$DI_f(ij) = f(x_1, x_2)$$

A escala de valores para este índice depende das aplicações. Neste trabalho, seu valor varia entre 0 (sem diferença entre  $X_1$  e  $X_2$ ) e 1 ( $X_1$  e  $X_2$  diferem) para a maioria das funções utilizadas. Se um índice de dano descreve bem o dano à estrutura estudada, espera-se que  $DI \cong 0$  represente um estado saudável e  $DI \gg 0$  represente um estado danificado/referência.

Existem vários indicadores e formas de detectar um dano: variações nas frequências naturais, nas deformações e no tempo de voo são alguns dos exemplos (RYTTER, 1993). Foi demonstrado que as ondas ultrassônicas (SU; YE; LU, 2006) são sensíveis a vários tipos de defeitos de fabricação e danos em serviço em materiais compósitos, incluindo vazios, porosidade, descolamento, delaminação, rompimento de fibra e desalinhamento de fibra. Em geral, pode-se afirmar que monitorando o comportamento de uma estrutura ao longo do tempo, suas propriedades dinâmicas podem ser avaliadas e utilizadas para distinguir variações na sua integridade estrutural.

Atuadores e sensores para identificação de danos usando ondas guiadas são frequentemente colocados de acordo com uma destas duas configurações: (i) transparência ou (ii) pulso-eco. Em qualquer configuração, as ondas transmitidas ou refletidas precisam ser analisadas usando alguns algoritmos de identificação de danos para extrair várias características (recursos sensíveis a danos) que contêm informações essenciais sobre o dano. Vários algoritmos de identificação de danos têm sido usados com ondas guiadas na literatura, que incluem tempo de voo (VALDEZ,

2001) (HARRI; GUILLAUME; VANLANDUIT, 2008) (LEMISTRE; BALAGEAS, 2001) (HODGKINSON; DIAMANTI; SOUTIS, 2003) (KESSLER; SPEARING; SOUTIS, 2002), índice de dano (SANTONI et al., 2007) (DE LUCA et al., 2020) (TORKAMANI et al., 2014) e inteligência artificial (LU et al., 2009) (SU; YE, 2005).

Um promissor índice de dano no domínio do tempo é baseado no coeficiente de correlação de Pearson e denominado coeficiente de diferença de sinal (*Signal Difference Coefficient*). Esse índice, como mostram (JIADONG; LIN; ZENG, 2015) (LISSENDEN et al., 2007), provou ser capaz de detecção precoce de danos por fadiga em placas de material compósito. O índice de correlação cruzada máxima percentual (EMMANUEL LIZÉ, 2018), também no domínio tempo, utiliza a correlação cruzada e tem sensibilidade a mudanças na fase do sinal. Como dito anteriormente, materiais compósitos sofrem degradação da rigidez durante a evolução dos mecanismos de dano relacionado a fadiga, logo supõe-se uma forte relação entre danos de fadiga e variação da fase em sinais de ondas guiadas. Já o índice relação de energia de Hilbert, também no domínio do tempo, utiliza a energia da onda como parâmetro e tem sensibilidade a mudanças na amplitude do sinal. De acordo com (DE LUCA et al., 2020), a presença de dano provoca variações nas amplitudes dos sinais que podem ser quantificadas por meio de índices de dano. Essa diferença é mais evidente para os sensores receptores do atuador mais próximos do dano. O índice perda central de espectro (*Central Spectrum Loss*) se trata de um índice de dano no domínio frequência, que tem por finalidade medir a mudança do espectro central de frequência entre o sinal de referência e o sinal monitorado. Esse índice, em conjunto com sistemas de redes neurais, provou ser capaz de detectar variações no tamanho de uma trinca em estruturas de alumínio como mostra (XU et al., 2019)

## 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais, os equipamentos e os métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho. Inicialmente são apresentados os materiais empregados para os ensaios mecânicos e térmicos, em seguida são mencionados os equipamentos e softwares utilizados para as etapas de carregamento mecânico, aquisição e tratamento de dados. Por fim, as metodologias de carregamento mecânico, extensometria de resistência elétrica, ultrassom convencional e ondas guiadas são explicitadas.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Tubo de PRFV fabricado por *Filament Winding*

Fundamentado nas normas ASME Section X e ASME RTP-1, foram definidas as especificações técnicas para a produção da amostra. A empresa responsável pela fabricação foi a Interfibra. O tubo, fabricado por meio do processo de filament winding, foi projetado para ter diâmetro interno de 150mm, 1200mm de comprimento e espessura de 4,5mm. Esse valor foi definido levando em conta a facilidade de obtenção de corpos de prova e o volume interno para pressurização durante ensaios de fadiga. A fabricação dos tubos foi dividida em duas etapas, são elas: produção do laminado interno (*liner*) e produção do laminado estrutural. O *liner*, produzido pelo processo *hand lay up*, é a parte do laminado que suporta o ataque químico direto do ambiente corrosivo, construído com uma ou duas camadas de véu de superfície de vidro. O véu assegura uniformidade de espessura e melhor resistência ao impacto e a abrasão. A Figura 5 mostra a etapa de produção do liner.

Figura 5: Etapa de produção do liner



Fonte: O AUTOR

O laminado estrutural, produzido pelo process de filament winding, é a parte que assegura a capacidade de resistência aos esforços internos e externos. Neste processo de enrolamento são utilizadas fibras de vidro contínuas enroladas helicoidalmente com um ângulo exato. Por fim, realiza-se aplicação de uma camada de resina parafinada para garantir a cura completa das últimas camadas. A Figura 6 mostra a etapa de produção da camada estrutural pela técnica de filament winding.

Figura 6: Etapa de produção da camada estrutural por *Filament Winding*.

Fonte: O AUTOR

A Tabela 1 exhibe as principais características dos tubos de PRFV fabricados por *Filament Winding*.

Tabela 1: Principais características dos tubos de PRFV fabricados por *Filament Winding*.

<i>Item</i>	<i>Característica</i>
Resina	Éster Vinílica (EV)
Roving de enleamento	740
Catalisador	Peróxido de metiletilcetona
Número de camadas	12
Ângulo de enleamento	+55 °/-55 °
Liner	1 véu sintético 25gr/m <sup>2</sup> 2 mantas 300gr/m <sup>2</sup>
Temperatura de cura	Ambiente

Fonte: O AUTOR

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Ensaio de fadiga

Dois tubos foram pressurizados internamente de forma cíclica para induzir danos por fadiga até a falha, que foi considerada quando a exsudação começou a aparecer na superfície externa do tubo. A Tabela 2 exibe a pressão mínima e máxima aplicada para cada ensaio, a frequência de carregamento foi de 0,8Hz em todos os ensaios.

Tabela 2: Parâmetros de carregamento por pressurização interna utilizados nos ensaios de fadiga.

<b>Ensaio</b>	<b>Pressão mínima [bar]</b>	<b>Pressão máxima [bar]</b>
A	4,5	45
B	5,5	55

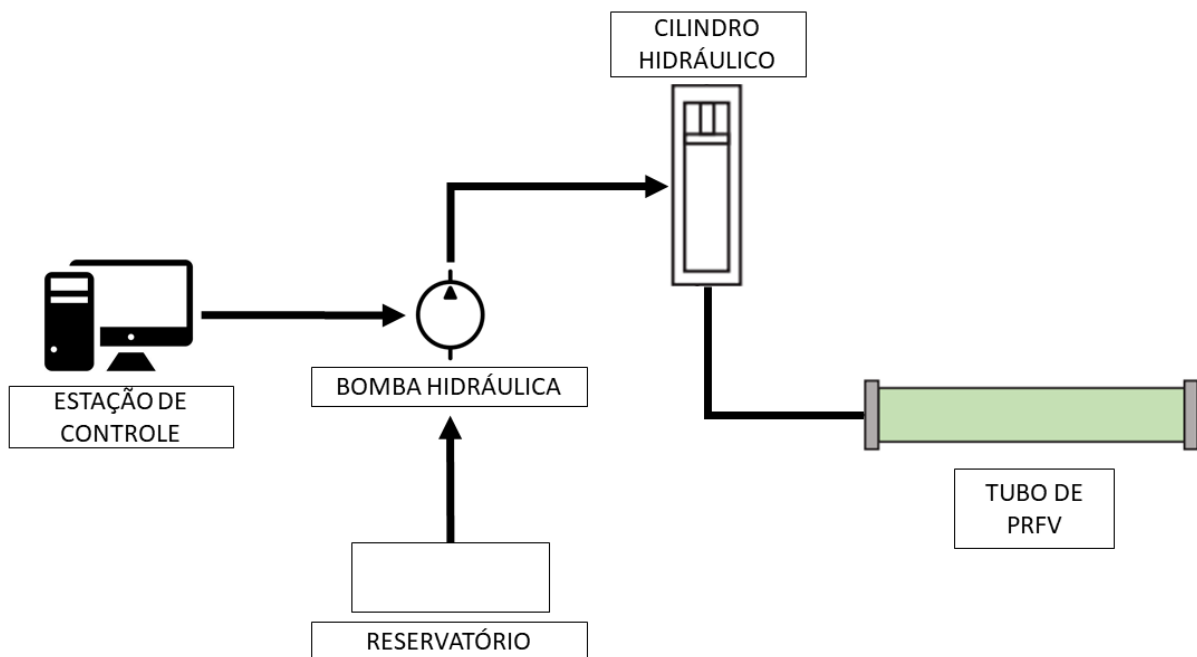
Fonte: O AUTOR

O equipamento empregado para realização do carregamento mecânico durante o ensaio de fadiga foi um atuador modelo *Servo-hydraulic Test System* da marca *MTS System Corporation*®. O software utilizado para configuração e controle do atuador foi o *MTS TestSuite*® versão 4.0 fornecido pelo próprio fabricante do equipamento. Para aquisição dos dados de pressurização foi utilizado o sistema de aquisição de dados universal modelo *QuantumX* da fabricante *HBM, Hottinger Baldwin Messtechnik*®. Em conjunto com o sistema de aquisição, o transdutor de pressão com capacidade nominal de até 500 bar modelo *P8AP* também da marca *HBM, Hottinger Baldwin Messtechnik*® foi utilizado como transdutor de pressão durante o ensaio de fadiga. O software utilizado para o controle do *QuantumX* foi o *Catman*® versão 5.4.2 fornecido pelo próprio fabricante do equipamento.

Vale salientar que dispositivos de vedação foram projetados e produzidos para possibilitar a realização dos ensaios de fadiga e ficam acoplados nas extremidades do tubo ensaiado. Estes

dispositivos foram projetados para atender o requisito de que o carregamento mecânico deve ser aplicado através de pressão interna e o estado de tensão resultante dessa pressurização, do ponto de vista de relação e direção das tensões principais, deve possuir as mesmas características das tensões aplicadas em um vaso de pressão. Dessa forma, os dispositivos de fechamento das extremidades das amostras dos tubos laminados foram projetados de modo a não restringir o deslocamento longitudinal do tubo. Para a fixação desses dispositivos nas extremidades do tubo e garantir a vedação completa da amostra foi utilizado a resina *ARAL 138* e endurecedor *ARAL 998* na proporção indicada pelo fabricante. A Figura 7 ilustra um diagrama esquemático do sistema utilizado para o controle e aplicação da pressão interna nos tubos de PRFV.

Figura 7: Diagrama esquemático do sistema utilizado para o controle e aplicação da pressão nos tubos de PRFV.



Fonte: O AUTOR

### 3.2.2 Extensometria de Resistência Elétrica

A técnica de extensometria de resistência elétrica foi utilizada para obtenção das deformações ao longo do ensaio de fadiga. O monitoramento das deformações foi realizado com três pares de sensores, um na longitudinal e outro na circunferencial. A região central do tubo foi escolhida para a instrumentação, onde cada par de sensor foi defasado em  $120^\circ$ . Essa configuração foi utilizada para ambas as amostras, FAD 09 e FAD 10. Por se tratar de um ensaio de longa duração, as aquisições foram realizadas em blocos de 10 segundos com intervalo entre cada bloco de 10 minutos. Para medir as deformações durante o ensaio de fadiga, extensômetros uniaxiais com comprimento de sensor ativo de 5 mm da fabricante *Micro-Measurements -VPG®* foram utilizados. Para aquisição dos dados foi utilizado o sistema de aquisição de dados universal

modelo *QuantumX* da fabricante *HBM, Hottinger Baldwin Messtechnik®*. O software utilizado para aquisição dos dados foi o *Catman®* versão 5.4.2 fornecido pelo próprio fabricante do equipamento.

Durante os diferentes instantes do ensaio de fadiga é selecionada para análise um intervalo de deformação em que se tem incremento da deformação com o tempo. É tomada o intervalo de tempo correspondente à região linear da rampa de subida da deformação. Vale ressaltar que essa metodologia não se trata do módulo de elasticidade, mas sim um estimador da propriedade elástica. Os valores de tensão utilizados para a determinação do estimador da propriedade elástica são calculados a partir dos valores de pressão e das dimensões do tubo de acordo com as equações de tensão para tubos de parede fina com comprimento infinito, conforme Equações 6 e 7.

$$\sigma_{circunferencial} = \frac{P \times r}{e} \quad (6)$$

$$\sigma_{longitudinal} = \frac{P \times r}{2 \times e} \quad (7)$$

onde  $P$  é a pressão,  $r$  é o raio e  $e$  é a espessura.

Esse valor é calculado a partir dos valores de pressão e das dimensões do tubo de acordo com as equações de tensão para tubos isotrópicos de parede fina com comprimento infinito. Já os valores de deformação são obtidos a partir dos valores de deformação medidos na direção longitudinal e circunferencial. No entanto, não é possível a utilização direta dos valores medidos com os ERE's. Isso porque para obtenção do módulo de elasticidade em uma determinada direção é necessário saber qual é a deformação causada exclusivamente por esta tensão nessa mesma direção. Como as amostras não são submetidas a um estado uniaxial de tensão, a deformação medida na circunferencial, por exemplo, será uma resultante da deformação causada pela tensão circunferencial mais uma componente de deformação causada pela tensão longitudinal. As deformações causadas pelas tensões em cada direção são calculadas pelas equações a seguir.

$$\varepsilon_{\sigma_{circunf.}} = \varepsilon_{circunf.} + \frac{\nu_{long.} * \sigma_{long.}}{\epsilon_{long.}} \quad (8)$$

onde  $\varepsilon_{\sigma_{circunf.}}$  é a deformação devido a tensão circunferencial,  $\varepsilon_{circunf.}$  é a medida da direção circunferencial e  $\nu_{long.}$  é o Poisson e  $\epsilon_{long.}$  o estimador da propriedade elástica longitudinal.

$$\varepsilon_{\sigma_{long.}} = \varepsilon_{long.} + \frac{\nu_{circunf.} * \sigma_{circunf.}}{\epsilon_{circunf.}} \quad (9)$$

onde  $\varepsilon_{\sigma_{long.}}$  é a deformação devido a tensão longitudinal,  $\varepsilon_{long.}$  é a medida da direção longitudinal e  $\nu_{circunf.}$  é o Poisson e  $\epsilon_{circunf.}$  o estimador da propriedade elástica circunferencial.

Para correção dos valores de deformação para um determinado número de ciclos é tomado como referência o valor do estimador da propriedade elástica correspondente ao determinado para o ciclo imediatamente anterior para o qual foi feita avaliação da degradação. Já os valores do

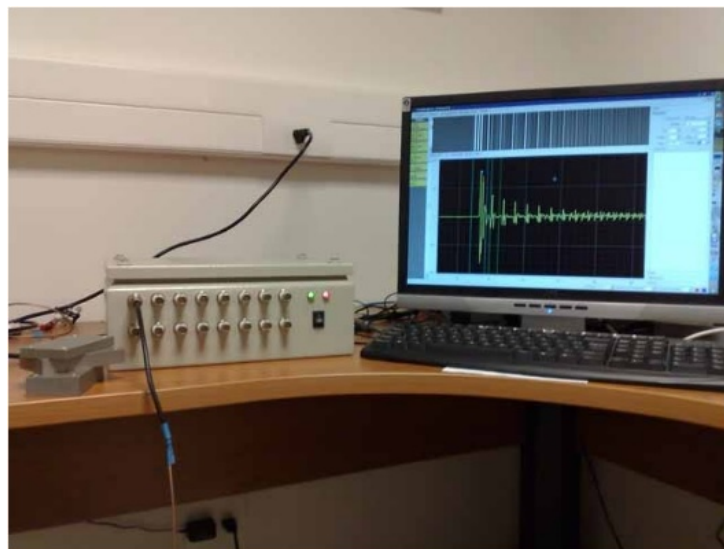
coeficiente de Poisson utilizados são sempre os mesmos valores iniciais, considera-se, portanto, que não há variação do módulo de elasticidade ao longo do ensaio de fadiga.

### 3.2.3 Ultrassom convencional

A técnica de ultrassom convencional foi utilizada para determinação do tempo de voo do feixe através da espessura do material. Para a amostra A foram realizadas 13 medidas ao longo do ensaio de fadiga, já para a amostra B foram realizadas 20 medidas ao longo do ensaio de fadiga. Sendo que para cada inspeção foi utilizada a média de 3 aquisições de dados. As medidas foram feitas em duas condições de fluido interno, ar e água.

O equipamento utilizado foi o *Ultra-som Multicanal* fabricado pela PUC-RIO em conjunto com o transdutor de onda longitudinal V103-RM da marca *Olympus*® com frequência de 1MHz e diâmetro nominal de 1/2". O equipamento e o *software* de aquisição podem ser vistos na Figura 8. Para a coleta dos dados de ultrassom, foi utilizado o software fornecido pelo próprio fabricante do equipamento, chamado *Usscope*®. Neste *software* é possível fazer a exportação do sinal A-scan para análise posterior. Após a coleta dos sinais, faz-se necessário fazer o tratamento de dados. Para essa etapa do trabalho, foi utilizado o *software* MATLAB® versão 2012b licenciada pela UFRGS.

Figura 8: Equipamento ULTRA-SOM MULTICANAL utilizado para as inspeções.



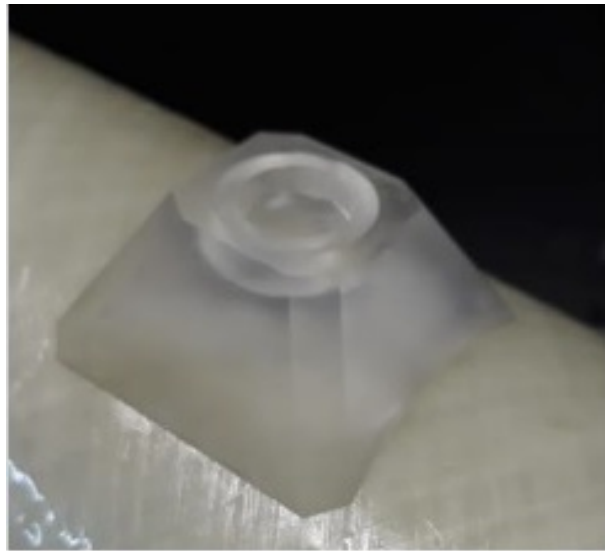
Fonte: PUC-RIO

Devido a pequena espessura do tubo, foram encontrados problemas de inspeção durante a fase de testes utilizando a técnica de ultrassom convencional. Basicamente, a reflexão da parede do tubo estava muito próxima da *zona morta* do sinal, o que dificultava a resolução das reflexões no *A-scan*. Com o propósito de melhorar o sinal e sabendo do fenômeno da interferência de ondas que ocorre na região adjacente ao transdutor ultrassônico, buscou-se utilizar atrasos de linha para que a reflexão ocorra onde o feixe ultrassônico é mais uniforme e intenso. Como a



geometria do corpo de prova de inspeção é tubular, preferiu-se não fazer uso de cabeçotes do tipo *delay line* visto que esse tipo de transdutor geralmente é fabricado para acoplamento em superfícies retas e não forneceriam o acoplamento adequado à superfícies curvas. Sendo assim, uma sapata piramidal foi especialmente projetada e produzida com o objetivo de diminuir o efeito da zona morta e facilitar o acoplamento do sensor na superfície curva do tubo. Para encontrar a altura ótima para a sapata, ou seja, onde a formação do feixe sonoro possui intensidade máxima, foi realizada a simulação de um sensor com frequência de 1MHz e diâmetro nominal de 1/2” de por meio do *software CIVA* e é apresentada com mais detalhes no capítulo dos resultados. Na Figura 9 é apresentada a sapata construída em acrílico *Plexiglass®* acoplada ao corpo de prova de PRFV.

Figura 9: Sapata piramidal após sua confecção acoplada em um tubo de PRFV.

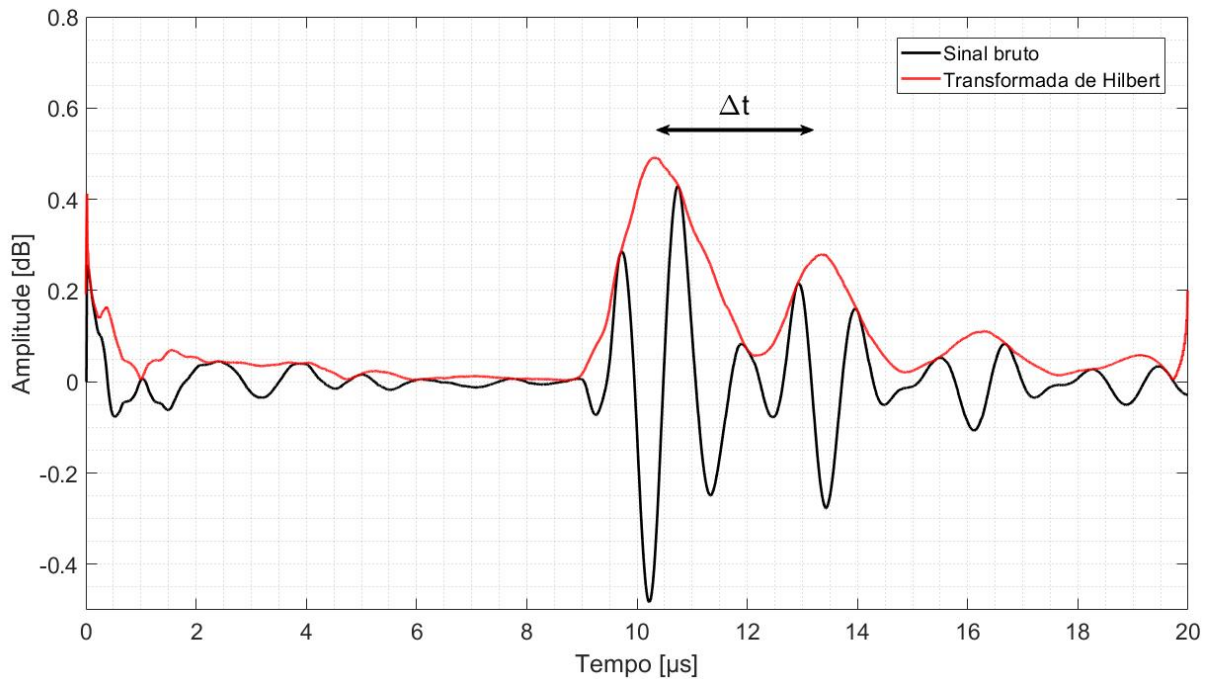


Fonte: O AUTOR

Para a aquisição dos sinais de ultrassom, foram selecionados três pontos alinhados na circunferencial ao longo do comprimento do tubo. Um ponto foi colocado no ponto médio do comprimento do tubo e os outros dois pontos ficaram afastados 150mm, sendo um para direita e o outro para a esquerda.

A fim de estimar o tempo de voo do feixe através da espessura do material, a diferença de tempo entre a reflexão da sapata e a reflexão da parede interna do tubo foi medida. A Figura 10 exhibe o sinal bruto sem média e a transformada de Hilbert que foi utilizada para o cálculo do tempo de voo. Para a avaliação do tempo de voo durante o ensaio de fadiga, foram utilizados os dados de ambas as condições de fluido interno, ar e água. Esse valor de tempo de voo foi utilizado para verificar a hipótese de que a variação da velocidade sônica teria correlação com os danos gerados ao longo do ensaio de fadiga.

Figura 10: Representação da transformada de Hilbert em um sinal de ultrassom convencional.



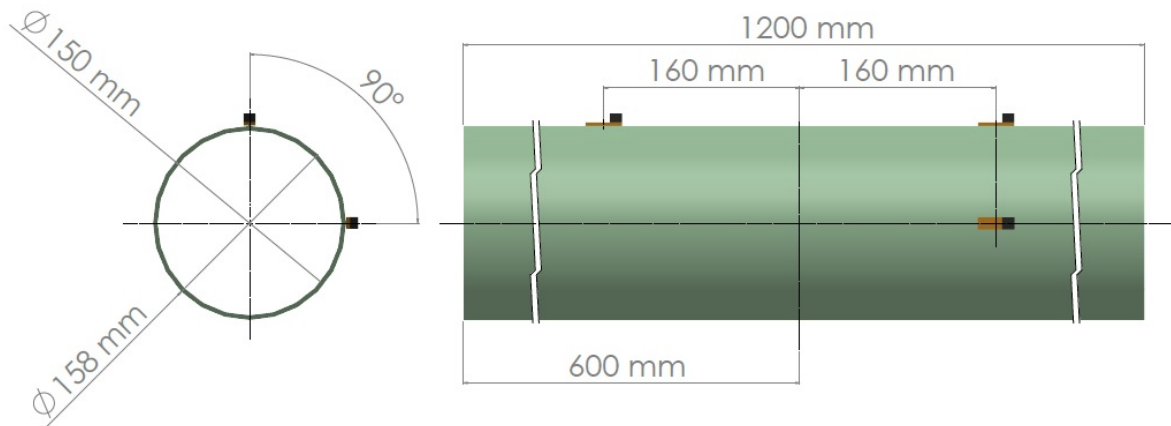
Fonte: O AUTOR

O tempo de voo é calculado a partir da transformada de hilbert do sinal, considerando a diferença máxima entre os picos de reflexão.

### 3.2.4 Ondas guiadas

Com o objetivo de avaliar o comportamento das ondas guiadas, dois sensores de recepção, defasados em  $90^\circ$  entre si, foram instalados a 320mm do sensor de emissão. A geometria do tubo e o posicionamento dos sensores é ilustrada na Figura 11. Ao longo do estudo o sensor alinhado com o emissor será chamado de sensor na direção longitudinal, já o sensor defasado em  $90^\circ$  a partir do emissor será chamado de sensor na direção circunferencial. O número de inspeções variou entre os ensaios de fadiga e de temperatura, que poderá ser visto no capítulo dos resultados. A condição de fluido interno para todos os ensaios foi água.

Figura 11: Esquema da geometria do tubo e do posicionamento dos sensores.



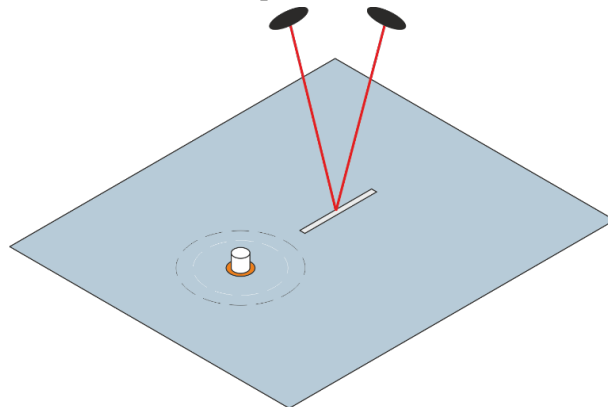
Fonte: O AUTOR

Foram utilizados sensores piezoelétricos da marca *Acellent*® com 6,35mm de diâmetro, 0,25mm de espessura e com polarização vertical. Para avaliação dos modos de propagação do sensor, fez-se a aquisição da resposta no tempo de 200 pontos sobre uma linha de 200 mm sobre a chapa. A aquisição foi feita por meio de dois vibrômetros opostos inclinados em um ângulo de 30° em relação à normal da chapa de alumínio com uma frequência de aquisição de 10 MHz por 0,5 ms. As Figuras 12a e 12b exibem a bancada utilizada para os ensaios no vibrômetro e o esquema utilizado para avaliação dos modos de propagação do sensor.

Figura 12: Bancada utilizada para os ensaios no vibrômetro e o esquema utilizado para avaliação dos modos de propagação do sensor.



(a) Bancada utilizada para os ensaios no vibrômetro.



(b) Esquema utilizado para avaliação dos modos de propagação do sensor.

Fonte: O AUTOR

Os deslocamentos do ponto são decompostos em deslocamento no plano e fora do plano e foram organizados em uma matriz em que uma dimensão representa o tempo e a outra dimensão representa a posição. Fez-se a transformada de *Fourier* em duas dimensões, obtendo-se uma relação entre o número de onda e a frequência. Essa relação auxilia na separação dos modos pois cada modo se propaga com um número de onda definido. A excitação foi realizada com a função *toneburst* com ciclos de 6 a 18, em intervalos de 2 em 2, nas frequências de 150 até 450 kHz, em intervalo de 50 em 50 kHz, respectivamente.

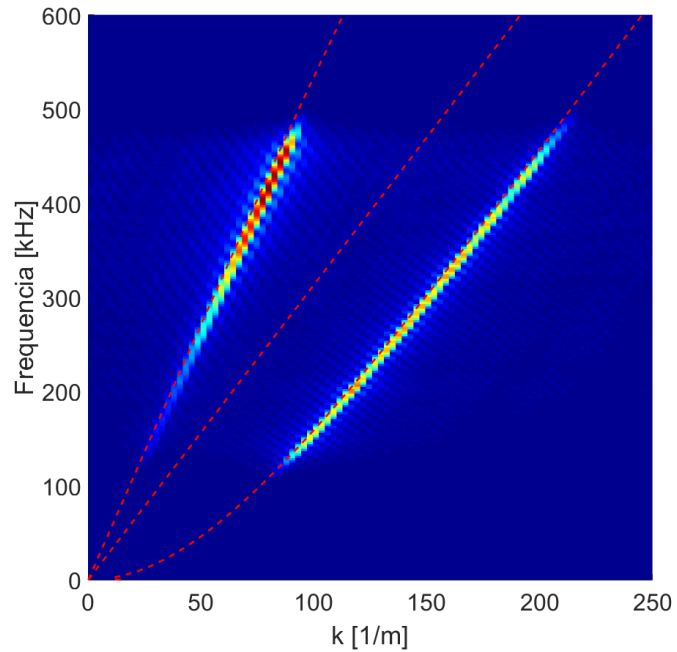
$$A(t) = w(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (10)$$

onde  $t$  é o tempo em segundos e  $f_c$  é a frequência central em Hertz.

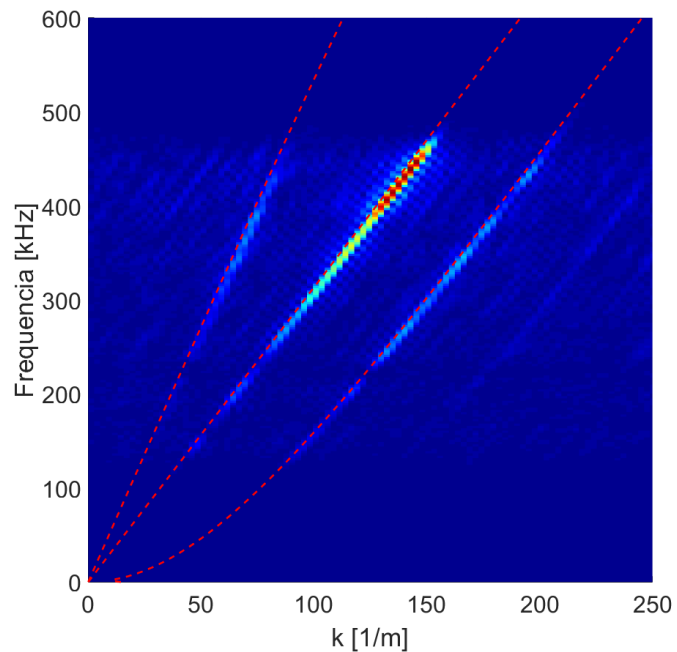
As Figuras 13a e 13b apresentam as amplitudes em função do número de onda e da frequência em uma escala de cores. As linhas pontilhadas representam as curvas teóricas obtidas através do

software Disperse® para os modos A0 e S0.

Figura 13: Relação entre frequência e número de onda.



(a) Modo S0 do sensor.



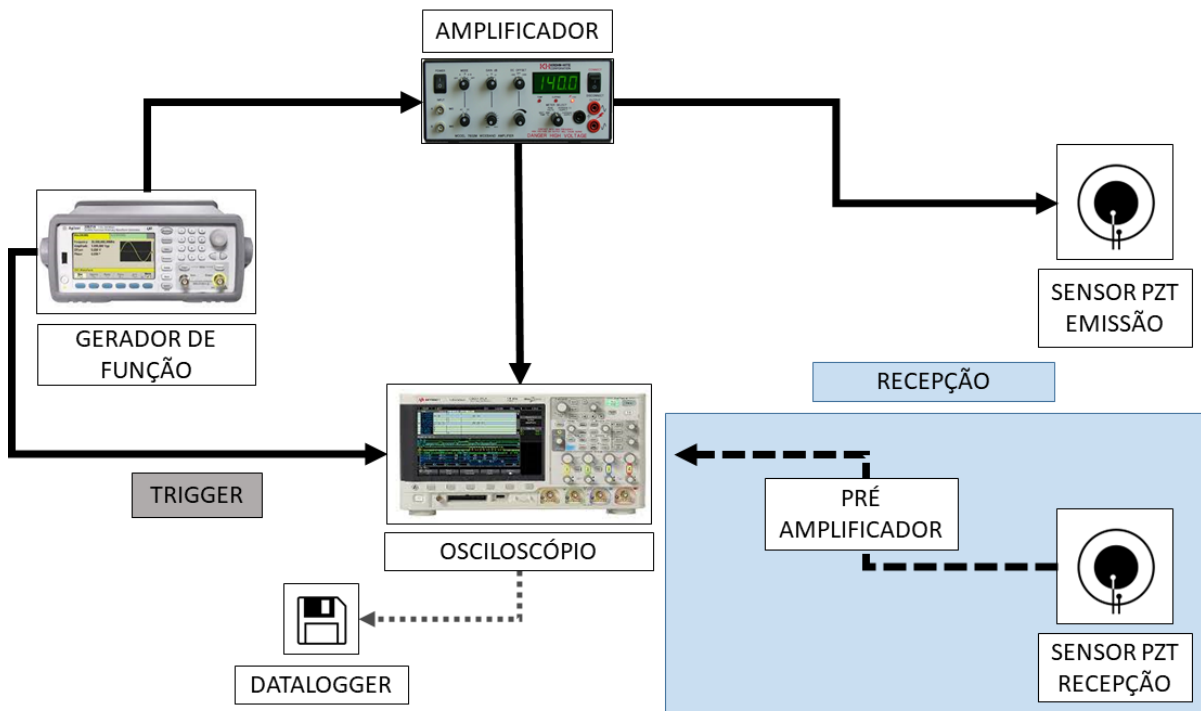
(b) Modo A0 do sensor.

Fonte: O AUTOR

Para emissão do sinal de ondas guiadas foi utilizado o gerador de sinais modelo 33521 - LXI do fabricante *Agilent Technologies*® ligado ao amplificador de sinal de banda larga modelo 7602M da fabricante *Krohn-Hite Corporation*. Um pré amplificador da fabricante *McWade*

*Monitoring Ltd*® foi utilizado para a recepção dos sensores. Por fim, o osciloscópio modelo DSOX3034A da fabricante *Agilent Technologies*® foi utilizado para aquisição dos sinais. Para a análise dos dados foi utilizado a ferramenta *MATLAB*® versão 2012b licenciada pela UFRGS. A Figura 14 ilustra um diagrama esquemático do sistema utilizado para emissão e recepção dos sinais de ondas guiadas nos tubos de PRFV.

Figura 14: Diagrama esquemático do sistema utilizado para emissão e recepção dos sinais de ondas guiadas nos tubos de PRFV.



Fonte: O AUTOR

Foram realizadas coletas periódicas em cinco frequências: 150kHz à 250kHz, em intervalos de 25kHz. O número de ciclos ( $n$ ) da *Tone Burst* utilizada na emissão foi  $n = 5$ . O pulso de uma *Tone Burst* janelada por Hanning é representado pela equação 10. Já a janela de Hanning pode ser descrita como segue a equação 11.

$$w(t) = \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi f_c t}{n} \right) \right) \quad (11)$$

onde  $n$  é o número de ciclos dentro da janela utilizada.

A amplitude do sinal, em volts, e o período, em segundos, são as variáveis armazenadas. Vale salientar que foi feito o janelamento dos sinais utilizando a função *tukeywin.m* do software *Matlab*®, conforme demonstra a Equação 12. A região escolhida para o janelamento foi o primeiro pacote de onda.

$$\omega(\chi) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{2} \{1 + \cos(\frac{2\pi}{r} [x - \frac{r}{2}])\}, & 0 \leq x < \frac{r}{2} \\ 1, & \frac{r}{2} \leq x < 1 - \frac{r}{2} \\ \frac{1}{2} \{1 + \cos(\frac{2\pi}{r} [x - 1 + \frac{r}{2}])\}, & 1 - \frac{r}{2} \leq x \leq 1 \end{array} \right\} \quad (12)$$

A abordagem de detecção de danos adotada é baseada na avaliação de índice de danos, conforme descrito no capítulo da revisão bibliográfica. Ao contrário dos resultados de ultrassom convencional, os resultados obtidos com os sinais de ondas guiadas motivaram o estudo de quatro diferentes índices de dano. Todos os índices de dano utilizados nesse estudo foram referenciados no capítulo da Revisão Bibliográfica. Para as equações dos índices de dano, considera-se ( $x_1$ ) como o sinal de referência (material em condição sem dano) e ( $x_2$ ) o sinal de monitoramento (material em condição com dano).

A Equação 13 coeficiente de diferença de sinal (*SDC*) é um índice de dano no domínio do tempo que descreve o grau de covariância entre o sinal de referência e o sinal de monitoramento.

$$SDC = 1 - \rho \quad (13)$$

onde  $\rho$  é representado pela equação

$$\rho = \frac{Cov(x_1, x_2)}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}} \quad (14)$$

onde a covariância é representado pela equação

$$Cov(x_1, x_2) = \frac{\sum_i^N (x_1(t_i) - \bar{x}_1)(x_2(t_i) - \bar{x}_2)}{N} \quad (15)$$

e os desvios padrão são representados pelas equações

$$\sigma_{x_1} = \sqrt{\sum_i^N (x_1(t_i) - \bar{x}_1)^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{x_2} = \sqrt{\sum_i^N (x_2(t_i) - \bar{x}_2)^2} \quad (17)$$

A Equação 18 correlação cruzada máxima percentual (*CCP*) é um índice de dano no domínio do tempo que descreve a variação percentual da correlação cruzada, considerando a amplitude máxima, entre o sinal de referência e o sinal de monitoramento.

$$CCP = 1 - \frac{\left| \max(\hat{R}\{x_1, x_1\}) - \max(\hat{R}\{x_1, x_2\}) \right|}{\max(\hat{R}\{x_1, x_1\})} \quad (18)$$

onde a correlação cruzada  $\hat{R}$  é representada pela equação

$$\hat{R} = (x_1 \star x_2)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t + \tau)dt \quad (19)$$

onde  $\tau$  é o atraso de tempo.

A Equação 20 relação de energia de Hilbert (*ENH*) é um índice de dano que mede a razão de energia da diferença entre o sinal de referência e o sinal de monitoramento usando a transformada de Hilbert.

$$\mathbf{ENH} = \sqrt{\frac{E_s(\text{env}\{x_2 - x_1\})}{E_s(\text{env}\{x_1\})}} \quad (20)$$

onde a energia do sinal em um intervalo  $N_1$  até  $N_2$  é representada pela equação

$$E_s[x(t)] = \sum_{k=N_1}^{N_2} [x(t)]^2 \quad (21)$$

e envelope do sinal utilizando a transformada de *Hilbert* é representada pela equação

$$\text{env}\{x(t)\}(t) = |H\{x(t)\}(t)| = \left| \frac{1}{\Pi} \text{vp} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \right\} \right| \quad (22)$$

A Equação 23 perda central de espectro (*SPL*) é uma índice de dano no domínio da frequência que mede a mudança do espectro central entre o sinal de referência e o sinal de monitoramento.

$$\mathbf{SPL} = \frac{a(\omega) - b(\omega)}{a(\omega)} \quad (23)$$

Para obtenção de  $a$  e  $b$  é necessário realizar a tranformada rápida de Fourier, representada pela equação

$$Y(k) = \sum_{j=1}^n x(j)W_n^{(j-1)(k-1)} \quad (24)$$

onde  $W_n$  é representado pela equação

$$W_n = e^{\frac{(-2\pi i)}{n}} \quad (25)$$

onde  $a$  é representada pela equação

$$a(\omega) = \max(x_1(\omega)) \quad (26)$$

e  $b$  é representada pela equação

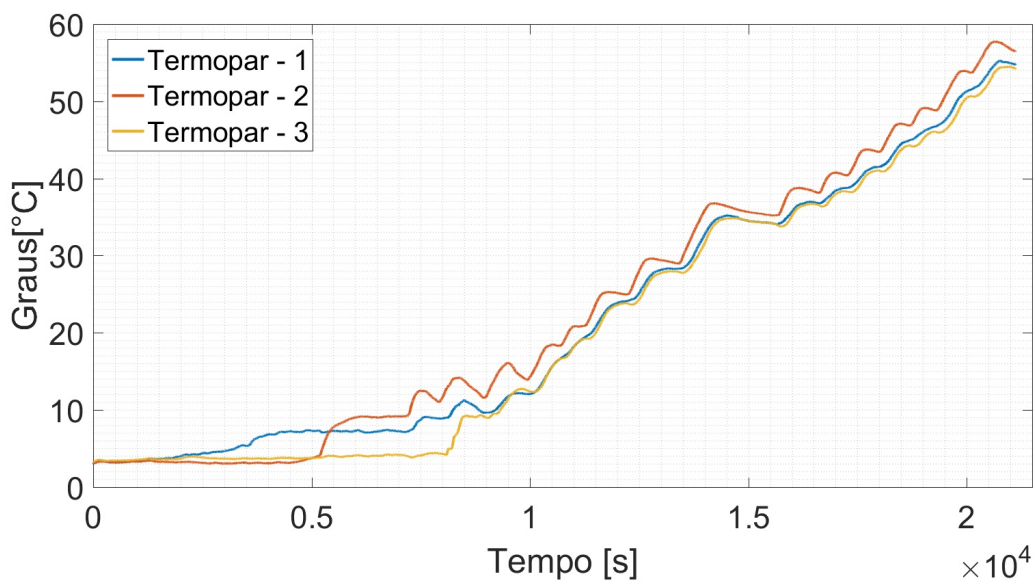
$$b(\omega) = \max(x_2(\omega)) \quad (27)$$



### 3.2.5 Ensaio de temperatura

Primeiramente, foi realizada uma investigação de como a temperatura afeta as técnicas e métodos utilizados neste trabalho. O intuito do ensaio foi verificar a influência da temperatura nas medidas de ondas guiadas. Para este ensaio, medidas de ondas guiadas foram realizadas no intervalo de temperatura de aproximadamente 3°C até 60°C. A Figura 15 exibe variação de temperatura para os três termopares utilizados durante o ensaio de avaliação da influência da temperatura.

Figura 15: Variação de temperatura para os três termopares utilizados durante a avaliação da influência da temperatura.



Fonte: O AUTOR

A influência da variação de temperatura no sinal de ondas guiadas bem como a sensibilidade de cada índice de dano serão apresentadas no capítulo dos resultados.

O ensaio de temperatura foi realizado com um corpo de prova igual ao utilizado nos ensaios de fadiga. Para a realização dos ensaios de temperatura foi necessário o desenvolvimento de um sistema de aquecimento e controle de temperatura. Tal sistema foi desenvolvido para ser instalado no dispositivo de fechamento das amostras. Para tanto, um dos lados do dispositivo de fechamento possui uma pré-câmara que permite o aquecimento da água antes da sua entrada no tubo. Toda a massa desse conjunto de fechamento do tubo, construído em aço inoxidável, é responsável pela transmissão do aquecimento da água no interior do tubo. O aquecimento é realizado através de uma resistência elétrica especialmente projetada e construída para acoplamento na parede externa da câmara de aquecimento, conforme a Figura 16. A resistência elétrica aquece a massa do dispositivo de fechamento que, por sua vez, transmite esse calor para a água. A amostra é montada e ensaiada de forma inclinada, entre a posição vertical e horizontal, e com o sistema de aquecimento instalado na sua parte inferior. Isso garante a homogeneização da temperatura

no interior da amostra através das correntes de convecção da água. A resistência foi ligada ao controlador de temperatura *NI040* da empresa *NOVUS®*.

Figura 16: Resistência elétrica projetada para o aquecimento durante o ensaio de temperatura.



Fonte: O AUTOR

Termopares tipo K da marca *HBM, Hottinger Baldwin Messtechnik®* foram utilizados para o controle de temperatura, estes foram posicionados a 10mm dos sensores piezoelétricos na superfície externa do tubo. Para facilitar a transferência de calor entre a parede do tubo e o termopar foi utilizado uma pasta térmica de base cerâmica. Visando diminuir os efeitos da temperatura externa, uma manta de fibra de vidro com aproximadamente 20mm de espessura foi utilizada como isolante ao redor do termopar. Com isso, foi possível obter uma medida de temperatura muito próxima a temperatura do sensor piezoelétrico acoplado na superfície externa do tubo. Para aquisição dos dados de temperatura foi utilizado o sistema de aquisição de dados universal modelo *QuantumX* da fabricante *HBM, Hottinger Baldwin Messtechnik®*. O software utilizado para aquisição dos dados foi o *Catman®* versão 5.4.2 fornecido pelo próprio fabricante do equipamento. Para inspeções por ondas guiadas, foram utilizados os mesmos equipamentos e a mesma metodologia citada anteriormente.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

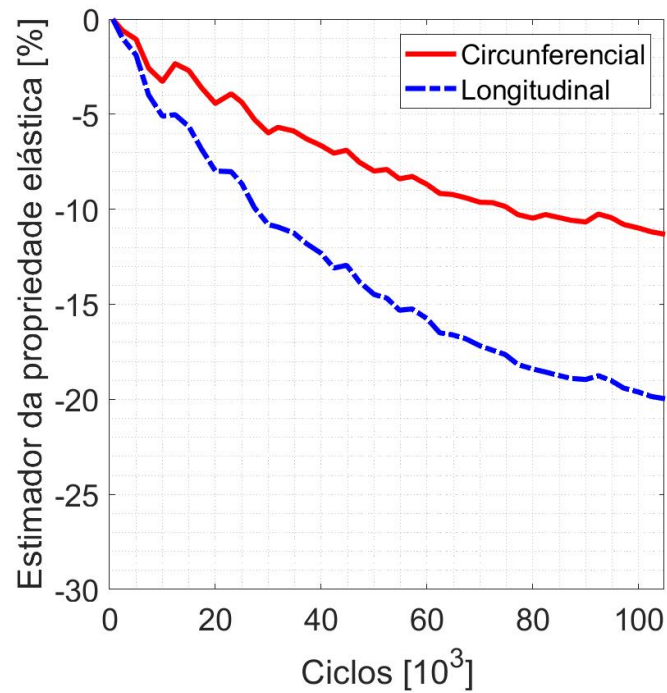
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do estudo. Primeiramente, com o objetivo de atestar a degradação da rigidez do tubo, os dados da consolidada técnica de ERE são apresentados. Em seguida, a fim de verificar a aplicabilidade do método de ultrassom convencional como critério para avaliar a degradação do material compósito, os sinais ultrassônicos são analisados. Os resultados relativos à técnica de ondas guiadas, por fim, são apresentados. Visando fundamentar o leitor acerca de variáveis que afetam os sinais de ondas guiadas, a influência da temperatura é analisada em ensaio isolado. Vale salientar que a influência da pressão não foi avaliada pois todas as inspeções foram realizadas com pressão igual a zero. Posteriormente, quatro diferentes índices de dano são avaliados.

### **4.1 Extensometria de resistência elétrica**

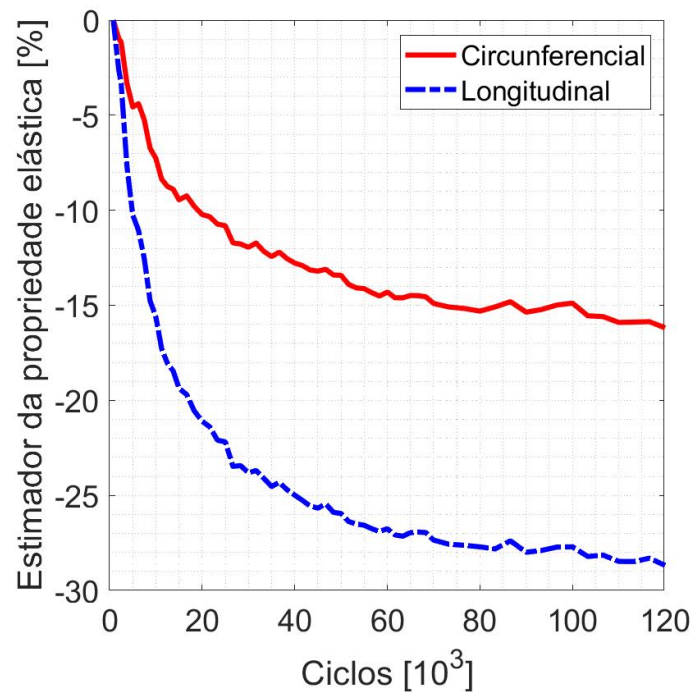
#### **4.1.1 Degradação do estimador da propriedade elástica do tubo**

Como referência indicativa do nível de degradação do material foram utilizadas as variações do estimador da propriedade elástica, as quais foram determinadas pelo monitoramento das deformações superficiais com extensômetro de resistência elétrica nas direções longitudinal e na circunferencial do tubo. Os resultados de monitoramento desse estimador da propriedade elástica durante os ensaios de fadiga das amostras A e B são apresentados em função do número de ciclos para cada uma das amostras nas Figuras 17a e 17b, respectivamente.

Figura 17: Variação do estimador da propriedade elástica longitudinal e circunferencial durante o ensaio de fadiga para a amostra A e B.



(a) Amostra A, carregamento máximo igual a 45 bar.



(b) Amostra B, carregamento máximo igual a 55 bar.

Fonte: O AUTOR

A partir dos resultados obtidos pela técnica de extensometria de resistência elétrica, é possível verificar que ocorreu uma degradação do estimador da propriedade elástica de aproximadamente

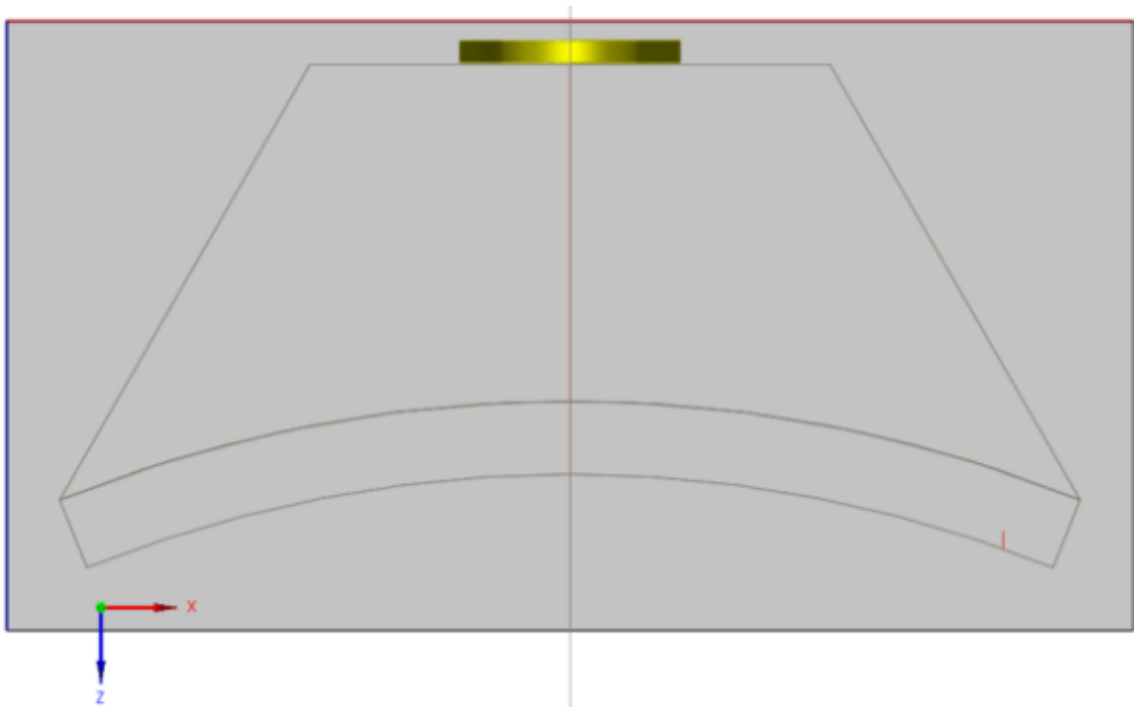
20% para a amostra A e de 29% para a amostra B. O estimador da propriedade elástica na direção longitudinal teve magnitude maior que o na direção cicunferencial em ambas amostras. Além disso, observa-se uma taxa negativa mais acentuada no estimador da propriedade elástica para a amostra B, principalmente para o início do ensaio. Esse resultado era esperado, visto que a amostra A foi submetida ao carregamento de 45 bar enquanto a amostra B foi submetida ao carregamento de 55 bar. Salienta-se que em ambos ensaios a razão de carregamento foi  $R = 0, 1$ .

## **4.2 Ultrassom convencional**

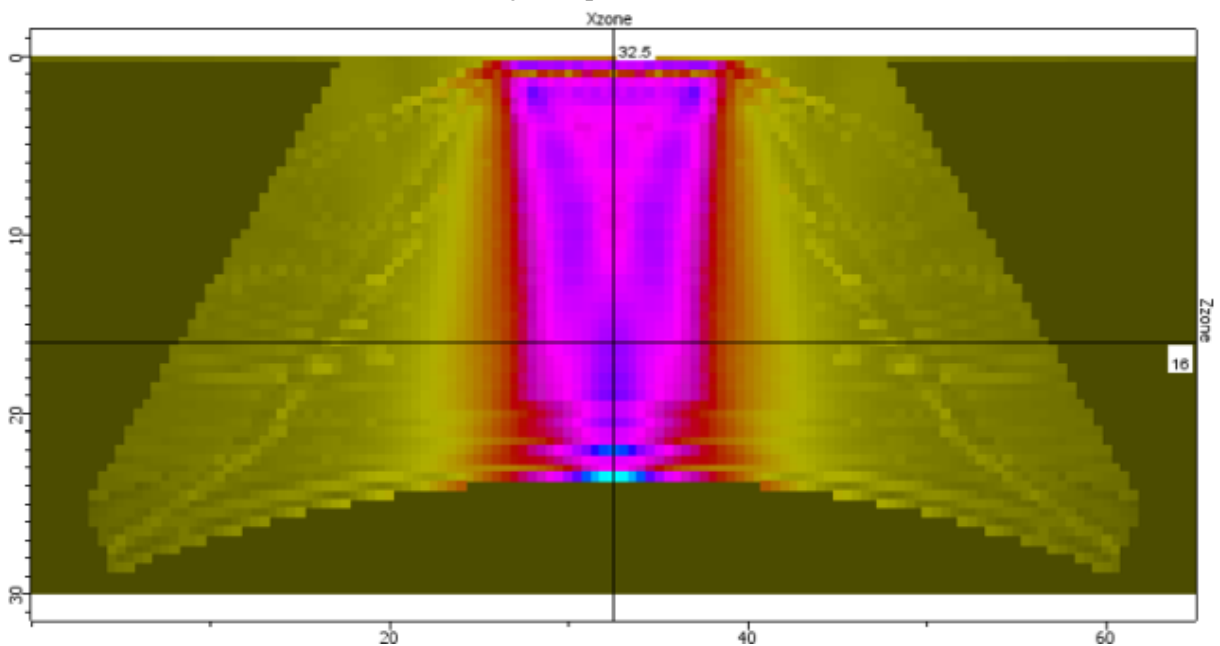
### **4.2.1 Projeto da sapata piramidal**

A Figura 20a ilustra o modelo que foi implementado no software CIVA® para simular um transdutor de 1 MHz com 1/2" de diâmetro incidindo no tubo através da sapata. Já a Figura 20b exibe o campo acústico gerado através do conjunto sapata/tubo. O campo próximo ótimo calculado fica a 16,14 mm abaixo do transdutor, onde observa-se uma maior intensidade do sinal na região de inspeção - aproximadamente na espessura do tubo. Esse valor foi utilizado para dimensionar a altura ótima da sapata piramidal utilizada para as inspeções por ultrassom convencional conforme mencionado anteriormente.

Figura 18: Modelo que foi implementado no software CIVA® para simular um transdutor de 1 MHz com 1/2" de diâmetro incidindo no tubo através da sapata e o campo acústico resultante.



(a) Modelo de simulação implementado no software CIVA®.



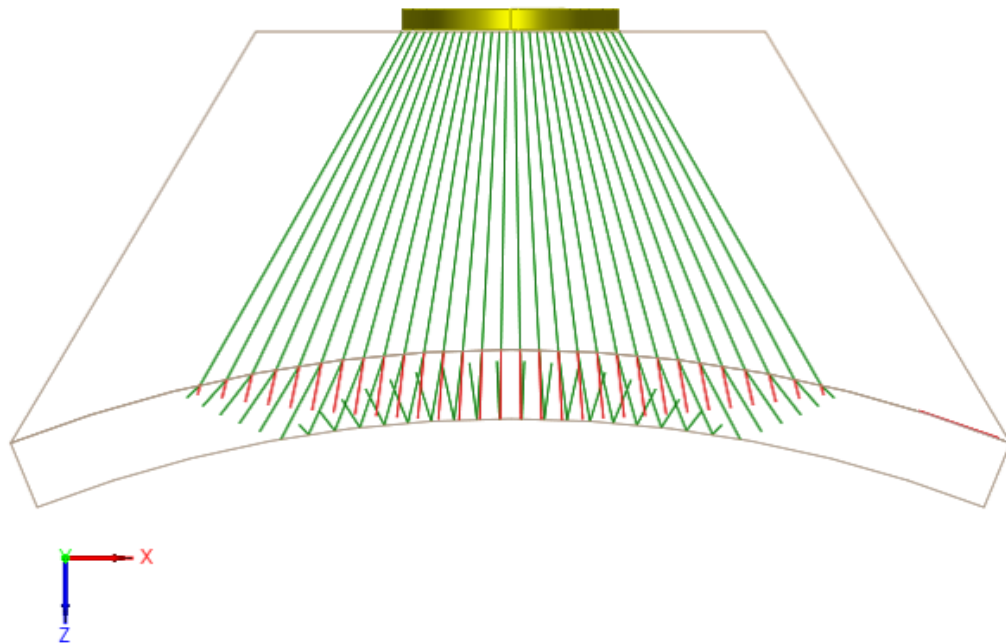
(b) Campo acústico gerado pelo transdutor de 1MHz.

Fonte: O AUTOR

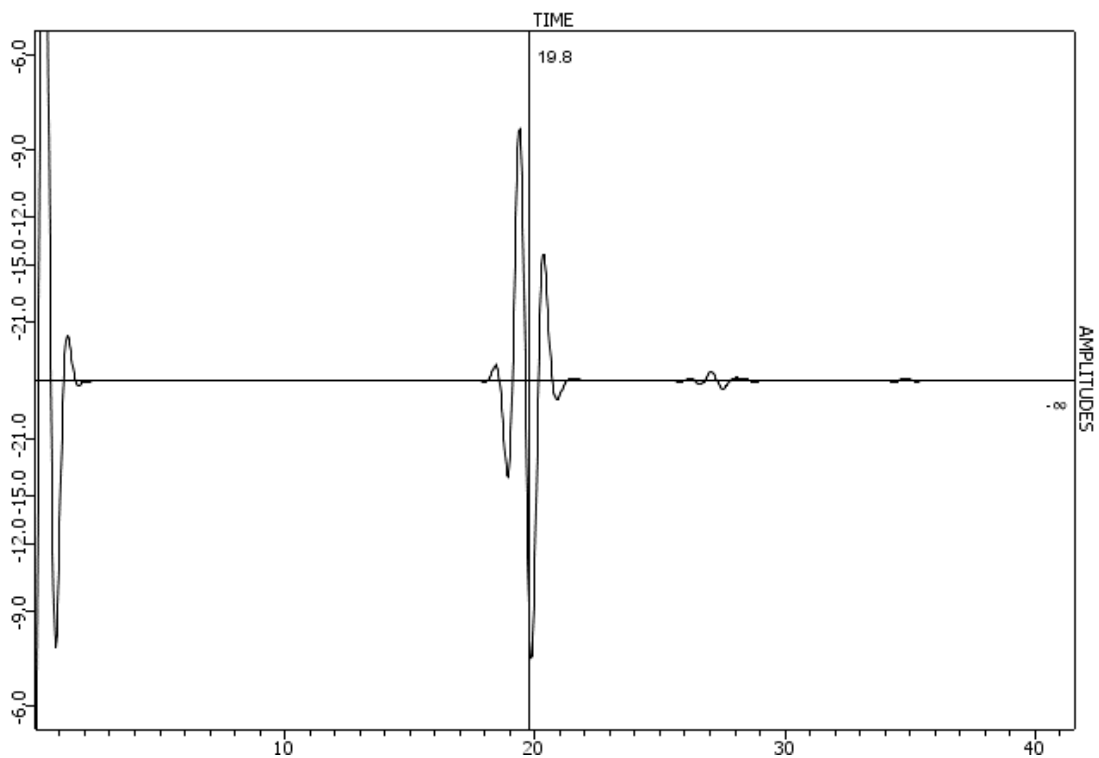
A Figura 19a mostra o feixe de ondas longitudinais interagindo com a interface e fundo do tubo. Nota-se a refração e conversão de modo na interface. A 19b exibe o A-scan resultante da sapata e tubo. O sinal que aparece é referente ao eco de fundo de 19,5  $\mu$ s. Devido ao software considerar um acoplamento perfeito entre o tubo e a sapata, o A-scan não indica o eco de fundo

entre sapata e tubo.

Figura 19: Modelo que foi implementado no software CIVA® para simular um transdutor de 1 MHz com 1/2" de diâmetro incidindo no tubo através da sapata e o campo acústico resultante.



(a) Feixe de ondas longitudinais interagindo com a interface e fundo do tubo.



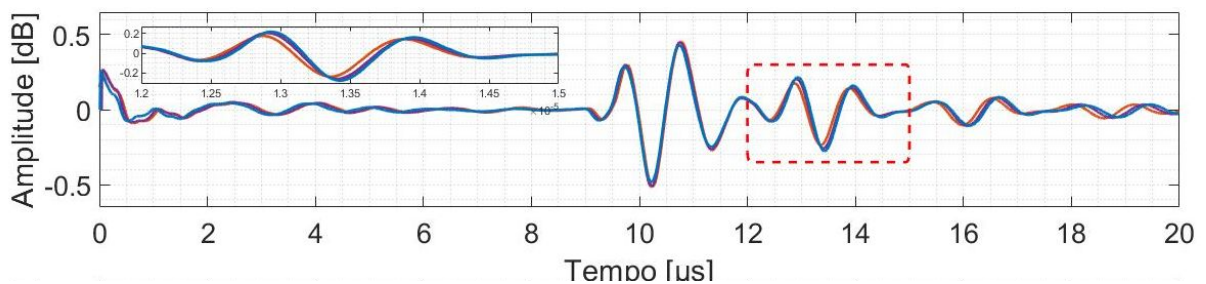
(b) A-scan da sapata e tubo. Não aparece o eco da interface entre sapata e tubo devido a uma limitação do CIVA®.

Fonte: O AUTOR

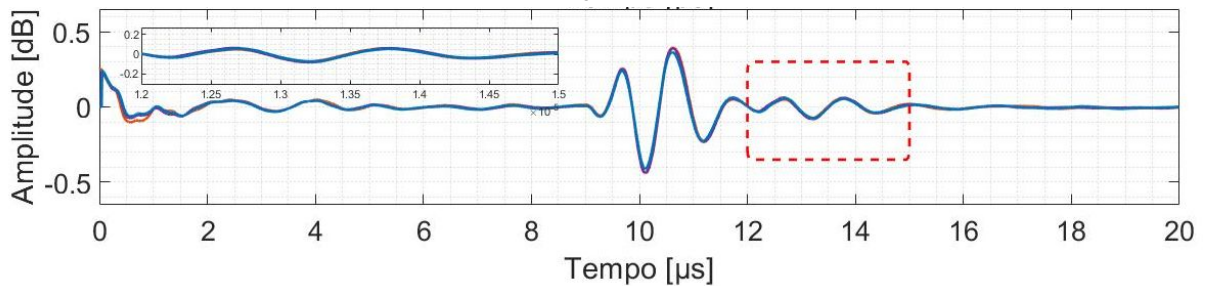
### 4.2.2 Apresentação do sinal

As Figuras 20a e 20b exibem sinais representativos das aquisições para um dos pontos de inspeção nas condições de fluido interno ar e água, respectivamente. A região em destaque representa o segmento do sinal referente a reflexão da parede interna do tubo. Vale salientar que a reflexão de maior intensidade, posicionada em aproximadamente  $10\mu s$ , trata-se da reflexão da sapata conforme mencionada anteriormente.

Figura 20: Sinais representativos das aquisições de ultrassom convencional para um dos pontos de inspeção nas condições de fluido interno ar e água. A região em destaque representa o segmento do sinal referente a reflexão da parede interna do tubo.



(a) Ar como condição de fluido interno.



(b) Água como condição de fluido interno.

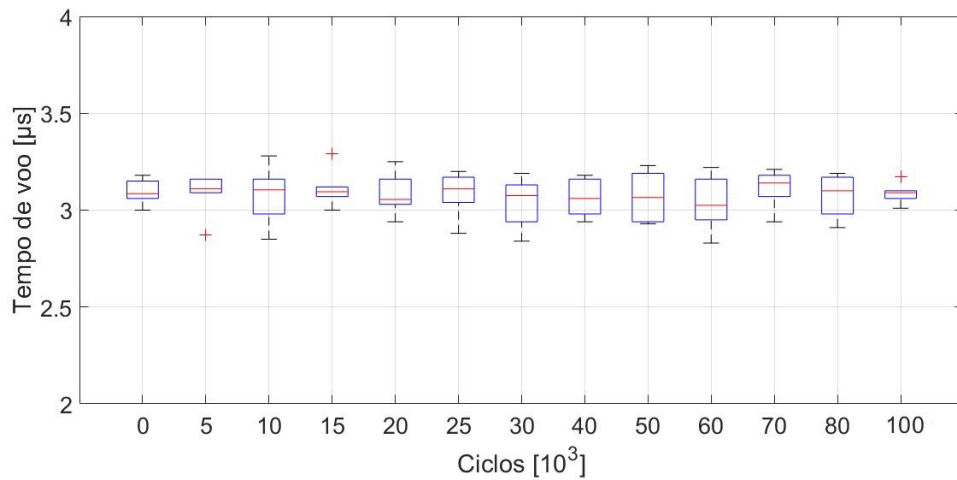
Fonte: O AUTOR

### 4.2.3 Avaliação do tempo de voo

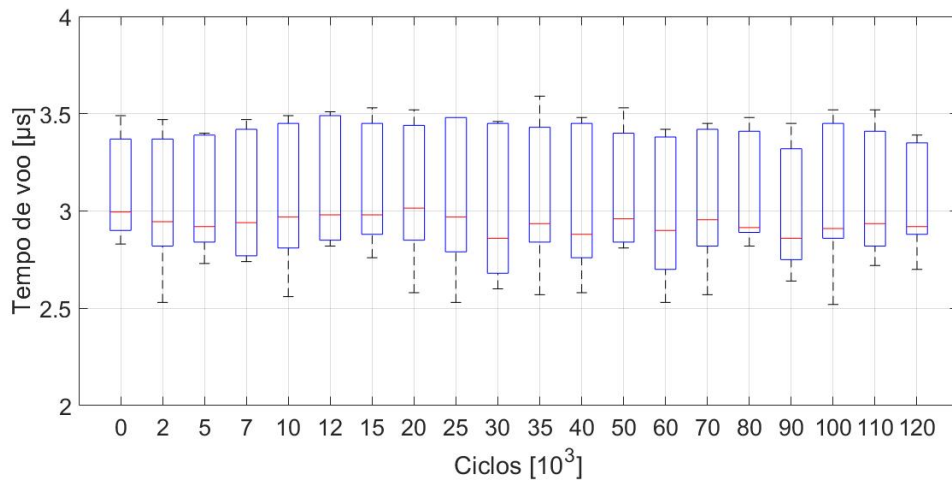
As Figuras 21a e 21b exibem a distribuição do tempo de voo ao longo do ensaio de fadiga para as amostras A e B, respectivamente.



Figura 21: Distribuição do tempo de voo ao longo do ensaio de fadiga para a amostra A (a) e B (b).



(a) Amostra A, carregamento máximo igual a 45 bar.



(b) Amostra B, carregamento máximo igual a 55 bar.

Fonte: O AUTOR

A análise das Figuras 21a e 21b permite fazer as seguintes considerações:

- I. Não foi possível observar uma variação significativa do tempo de voo ao longo do ensaio de fadiga para ambas amostras;
- II. A amostra B teve uma dispersão consideravelmente maior do que a amostra A.

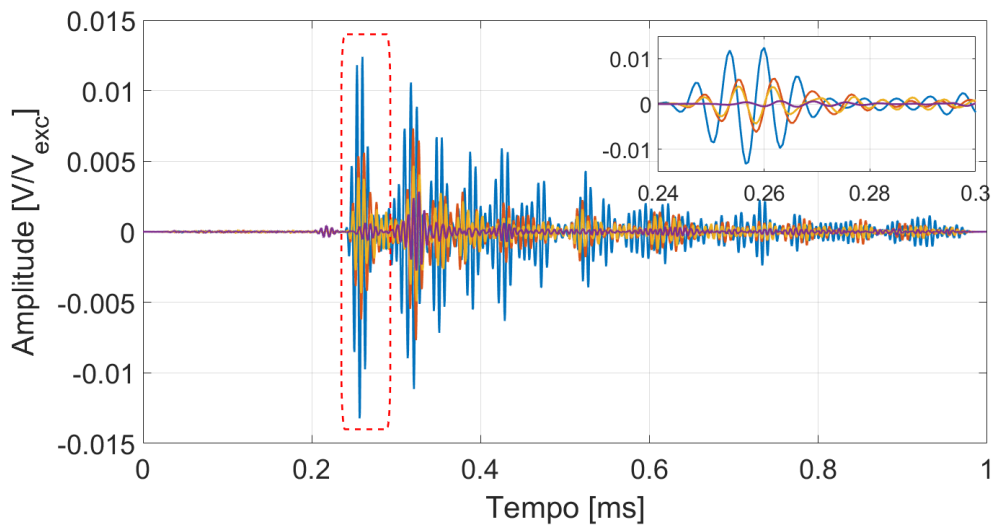
A razão para a dispersão se deve possivelmente a variabilidade microestrutural do material e a região de inspeção limitada para esse tipo de material. Essas hipóteses devem ser investigadas em trabalhos futuros.

## 4.3 Ondas guiadas

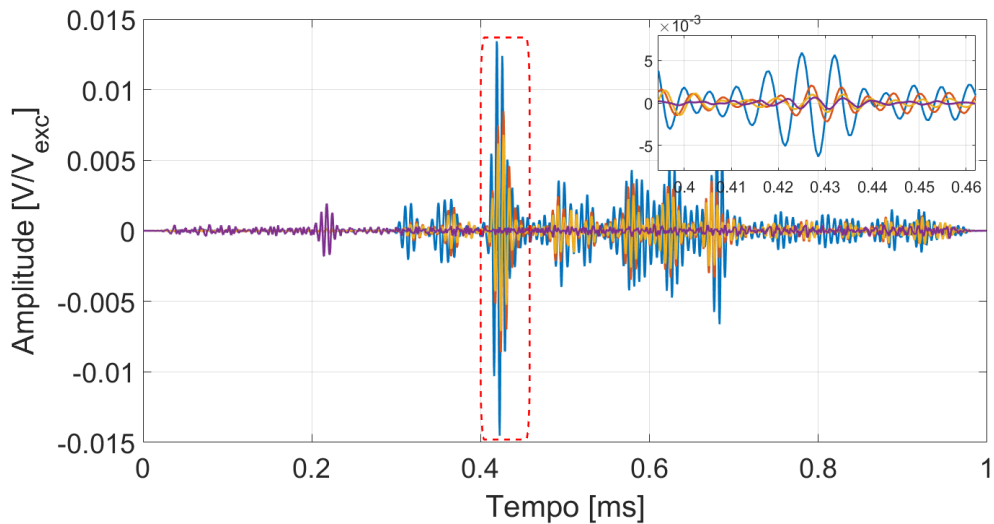
### 4.3.1 Apresentação do sinal

As Figuras 22a e 22b exibem sinais representativos das aquisições para os sensores nas direções circunferencial e logitudinal em quatro diferentes estágios de degradação do tubo, respectivamente. A região em destaque representa o fragmento do sinal no qual foram aplicados os índices de dano.

Figura 22: Sinal em quatro diferentes estágios de degradação para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b). A região em destaque representa o fragmento do sinal utilizado para aplicação dos índices de dano.



(a) Sensor na direção circunferencial.

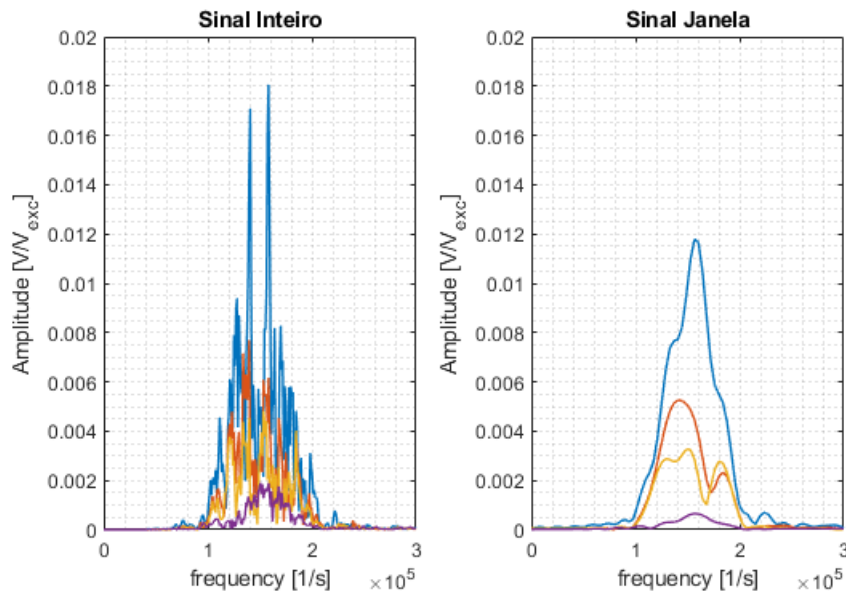


(b) Sensor na direção longitudinal.

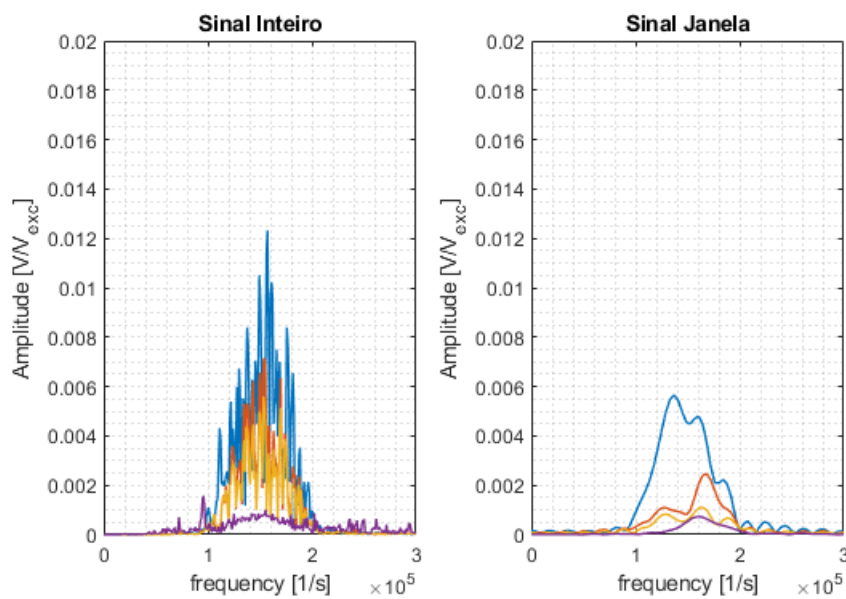
Fonte: O AUTOR

As Figuras 23a e 23b exibem sinais representativos para a transformada rápida de Fourier do sinal para os sensores nas direções circunferencial e longitudinal, respectivamente.

Figura 23: Transformada rápida de Fourier para o sinal inteiro e após o janelamento com a função *tukey.m* do software *MATLAB*® para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b).



(a) Sensor na direção circunferencial.



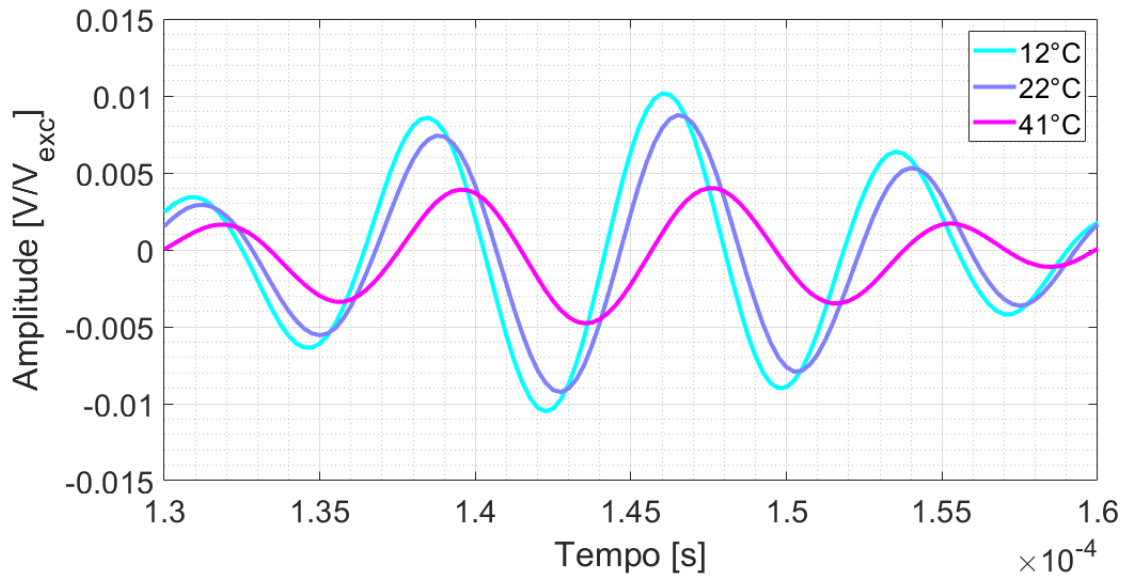
(b) Sensor na direção longitudinal.

Fonte: O AUTOR

### 4.3.2 Avaliação da influência da temperatura nos índices de dano

Um grande fator que está presente na grande maioria das inspeções em serviço é o não controle da temperatura de operação. Sendo assim, essa seção tem como objetivo avaliar a sensibilidade de cada índice dano à temperatura. Primeiramente, a variação do sinal para o ensaio de ondas guiadas devido ao aumento de temperatura é apresentada, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24: Variação do sinal de onda guiada a 12°C, 22°C e 41°C.



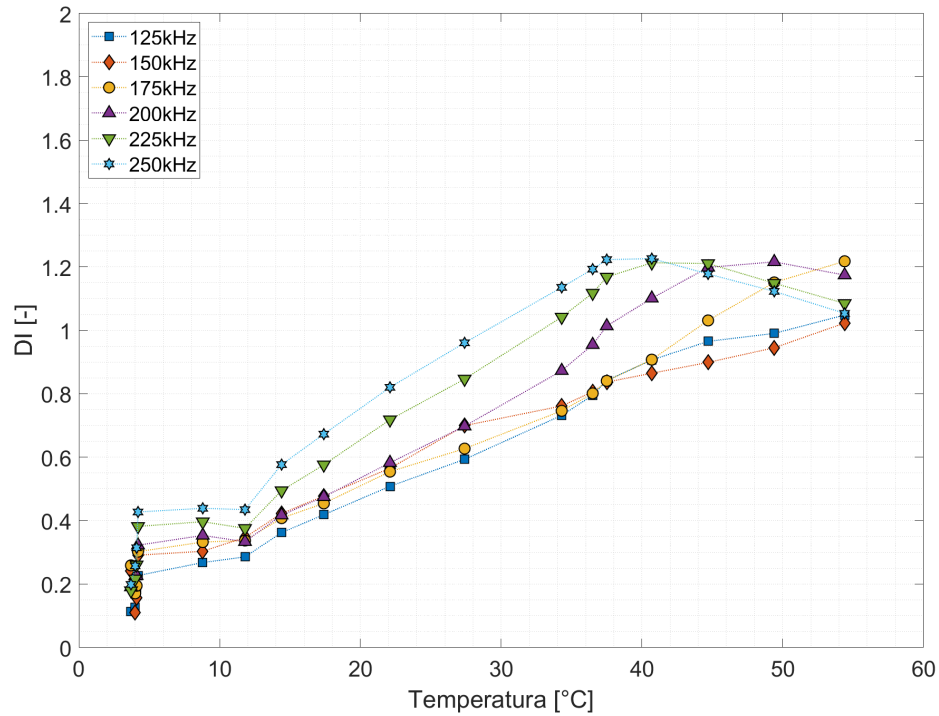
Fonte: O AUTOR, 2021

Em seguida, os índices de dano são apresentados para o intervalo de temperatura de aproximadamente 3°C a 60°C. A temperatura de referência considerada foi a primeira medida em aproximadamente 3°C. A principal contribuição desse resultado é conseguir estimar qual a magnitude de variação de cada índice de dano devido a variação de temperatura para cada sensor e frequência. Após, uma comparação é feita através da medida da amplitude de variação dos índices de dano entre a faixa de temperatura utilizada nos ensaios de fadigas deste trabalho, mais especificamente entre 24°C a 32°C. Vale salientar que esses índices possuem limites de variações distintos, logo deve-se comparar cada valor de forma isolada.

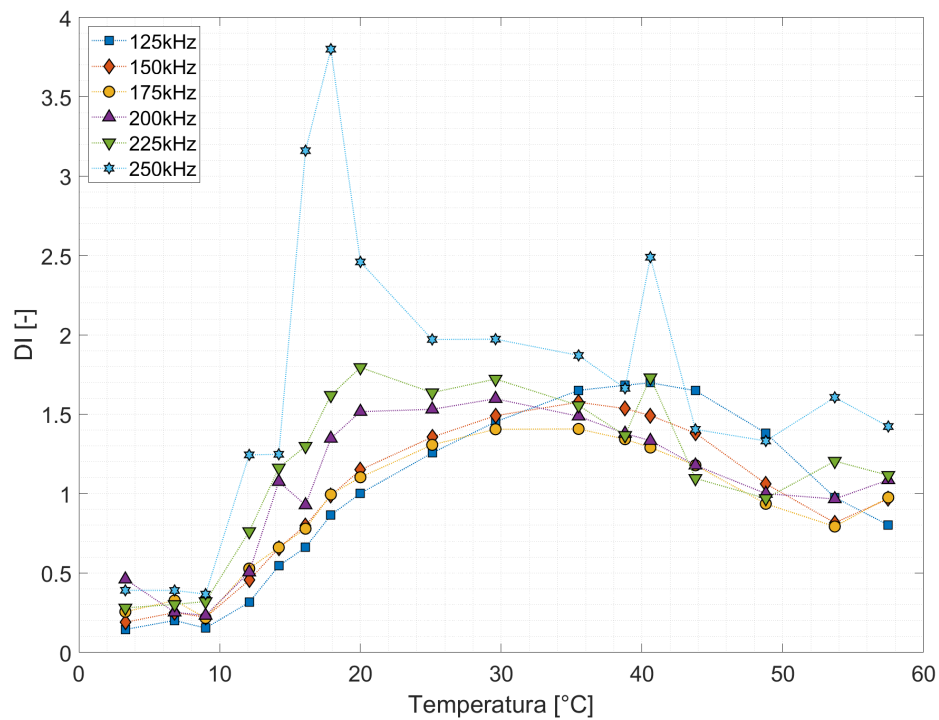
#### 4.3.2.1 Índice de dano relação de energia de Hilbert

A Figura 25 exibe o índice de dano relação de energia de Hilbert versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial e longitudinal. Vale salientar que para esse índice o eixo vertical não é o mesmo para as duas figuras, visto que para o sensor na direção longitudinal ocorreu uma variação muito acima da escala para a frequência de 250kHz. Sendo assim, com o intuito de manter a integridade de apresentação dos dados, foi alterada a escala para cada representação.

Figura 25: Índice de dano relação de energia de Hilbert versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b).



(a) Sensor na direção circunferencial.



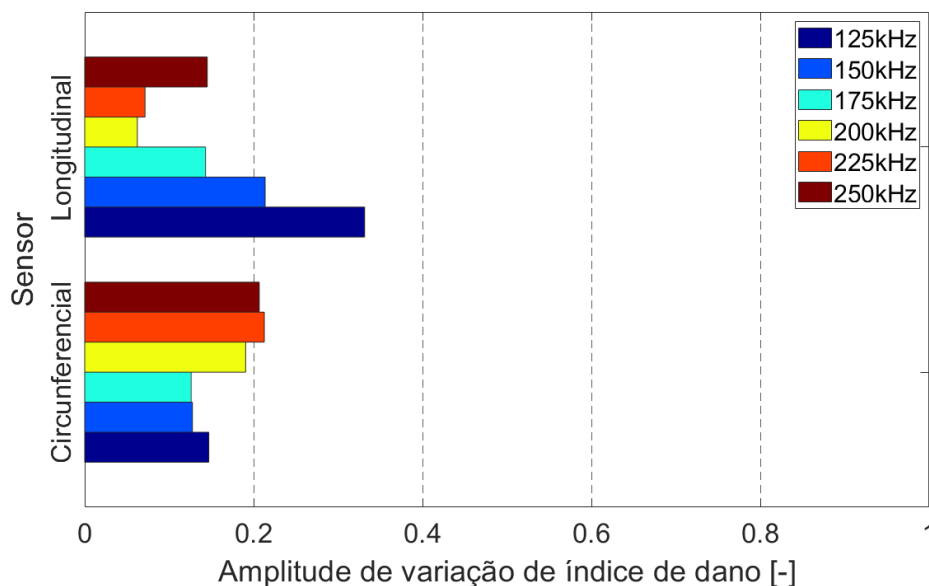
(b) Sensor na direção longitudinal.

Fonte: O AUTOR

A Figura 25 exibe uma clara sensibilidade do índice de dano para com a temperatura. Sabe-se que o desempenho mecânico de materiais poliméricos submetidos a aumento de temperatura é caracterizado por uma significativa diminuição da rigidez e resistência. Essa a diminuição da rigidez produz um maior amortecimento da onda, resultando em uma atenuação do sinal conforme eleva-se a temperatura. Para o sensor na direção circunferencial Figura 25(a) as frequências de 125 kHz a 175 kHz tiveram um comportamento aparentemente linear durante todo o intervalo de temperatura, porém as frequências de 200 a 250 kHz ocorreu uma queda da curva entre as temperaturas de 35°C e 50°C aproximadamente. Já para o sensor na direção longitudinal Figura 25(b) observou-se uma maior variabilidade dos resultados, principalmente para as frequências maiores. Uma das hipóteses para esse resultado seria a maior distância percorrida pela onda para esse sensor, ocasionando uma maior interação entre a onda e a estrutura heterogênea do compósito. Outro fator importante é a anisotropia do material que afeta as suas propriedades mecânicas em relação a sua direção e conseqüentemente a propagação da onda para cada um dos sensores. Além disso, o ponto de inflexão da curva DI versus temperatura está presente em todas as frequências de emissão para o sensor na direção longitudinal. Para as frequências menores, o ponto de inflexão ocorre em 30°C e 40°C, aproximadamente. Já para as frequências maiores, o ponto de inflexão ocorre em temperaturas menores, 20°C e 30°C, aproximadamente.

A Figura 26 exibe a medida da amplitude de variação do índice de dano relação de energia de Hilbert entre a faixa de temperatura utilizada nos ensaios de fadigas deste trabalho, mais especificamente entre 24°C a 32°C.

Figura 26: Variação máxima do índice de dano relação de energia de Hilbert no intervalo de temperatura entre 24 e 32°C.



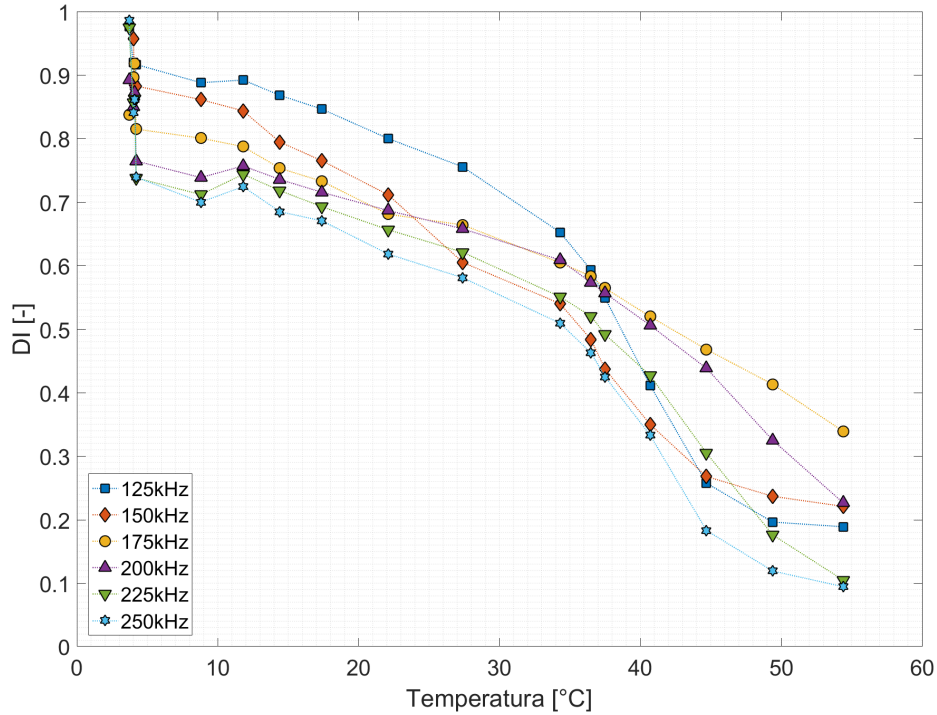
Fonte: O AUTOR

Para o sensor na direção circunferencial, cujos resultados apresentaram tendência linear, as frequências menores apresentaram menor amplitude de variação em relação a variação de temperatura quando comparadas com as frequências maiores. Devido ao fato dos pontos de inflexão serem acima do intervalo de temperatura de operação (entre 24°C e 32°C), os resultados da Figura 26 não foram afetados por essa mudança de concavidade na curva, resultando em uma variação de temperatura proporcional a frequência de emissão. Para o sensor na direção longitudinal, cujos resultados apresentaram maior variabilidade, os resultados de variação de temperatura não apresentaram uma tendência entre frequências maiores e menores. A explicação para isso se deve ao fato dos pontos de inflexão ocorrerem dentro do intervalo de temperatura de operação (entre 24 e 32°C). Sendo assim, os resultados da Figura 26 foram afetados por essa mudança de concavidade na curva, resultando em uma variação de temperatura não proporcional entre a frequência de emissão.

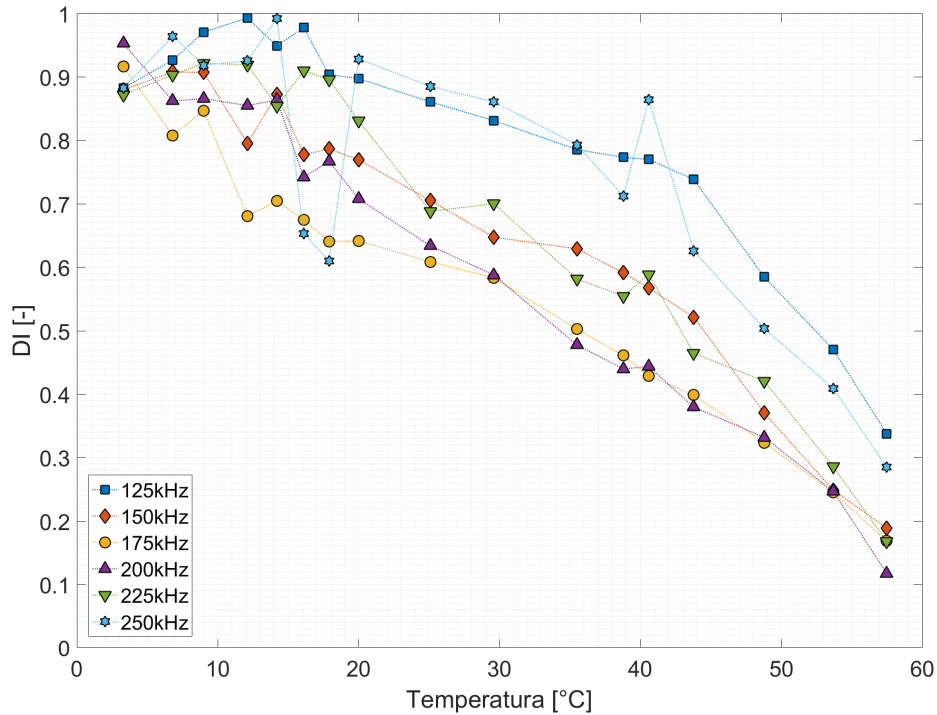
#### *4.3.2.2 Índice de dano correlação cruzada máxima percentual*

A Figura 27 exibe o índice de correlação cruzada máxima percentual versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial e longitudinal.

Figura 27: Índice de dano correlação cruzada máxima percentual versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b).



(a) Sensor na direção circunferencial.



(b) Sensor na direção longitudinal.

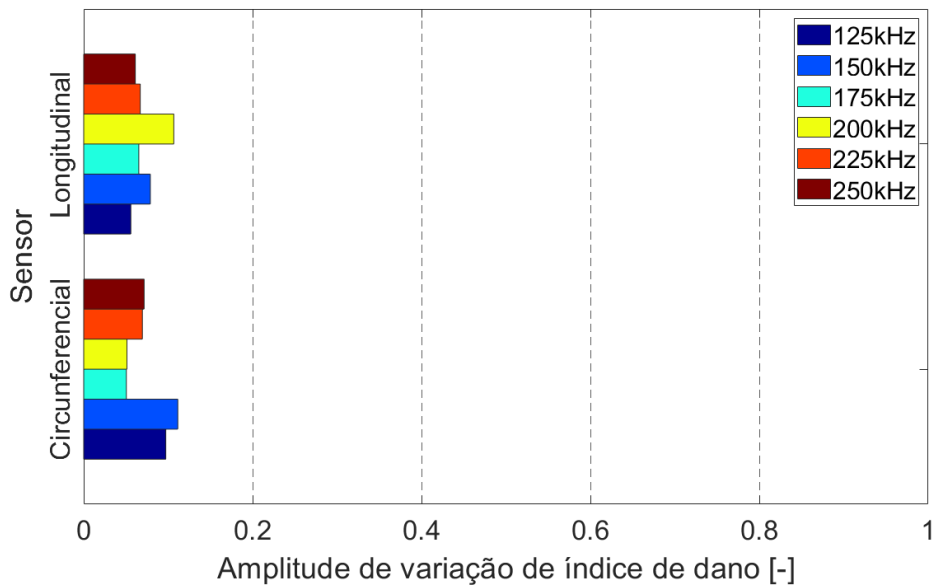
Fonte: O AUTOR



A Figura 27 exibe uma clara sensibilidade do índice de dano para com a temperatura para ambos os sensores, nas direções longitudinal e circunferencial. Para o sensor na direção circunferencial Figura 27(a) todas as frequências tiveram um comportamento aparentemente linear com coeficiente angular negativo para o aumento da temperatura durante todo o intervalo analisado, com uma pequena variação na magnitude das medidas. Já para o sensor na direção longitudinal Figura 27(b) a variabilidade entre as medidas e frequências foi maior, mantendo o comportamento visto no índice de dano anterior. Além da atenuação do sinal descrita por meio do índice de dano relação de energia de Hilbert, a mudança de fase (atraso) da onda também é observada quando aumentamos a temperatura do corpo de prova, como pode ser visto na Figura 24.

A Figura 28 exibe a medida da amplitude de variação do índice de dano correlação cruzada máxima percentual entre a faixa de temperatura utilizada nos ensaios de fadigas deste trabalho, mais especificamente entre 24°C a 32°C.

Figura 28: Variação máxima do índice de dano correlação cruzada máxima percentual no intervalo de temperatura entre 24 e 32°C.



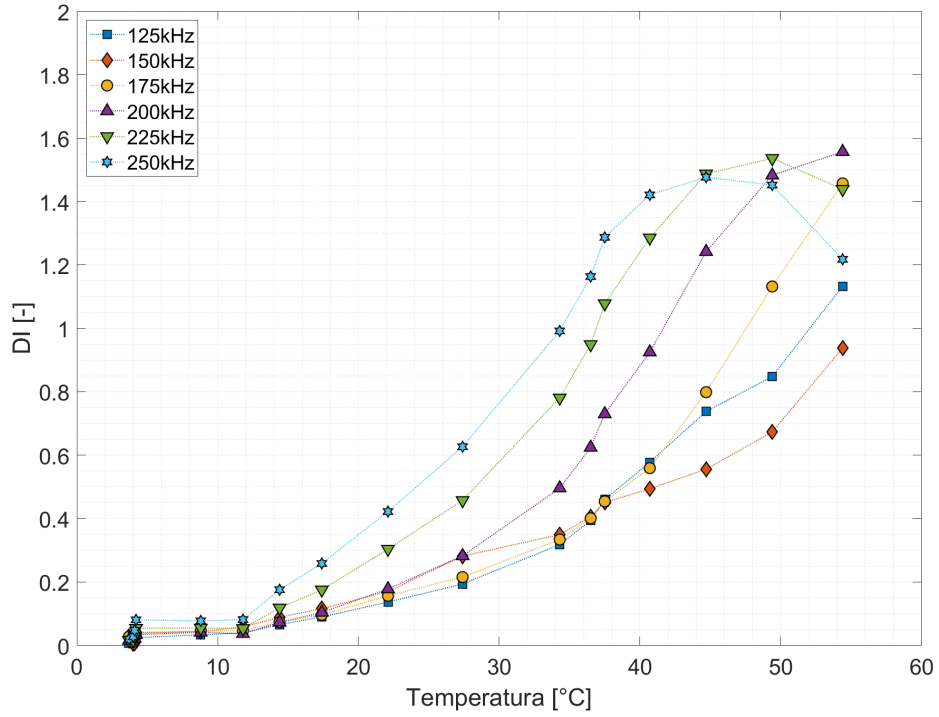
Fonte: O AUTOR

Devido ao fato de não ocorrer variações na concavidade das curvas, a variação máxima absoluta não teve variações significativas. Esse fato evidencia uma característica particular desse índice de dano que é a pequena variação em relação a variação de temperatura para todas as frequências de emissão utilizadas nesse estudo.

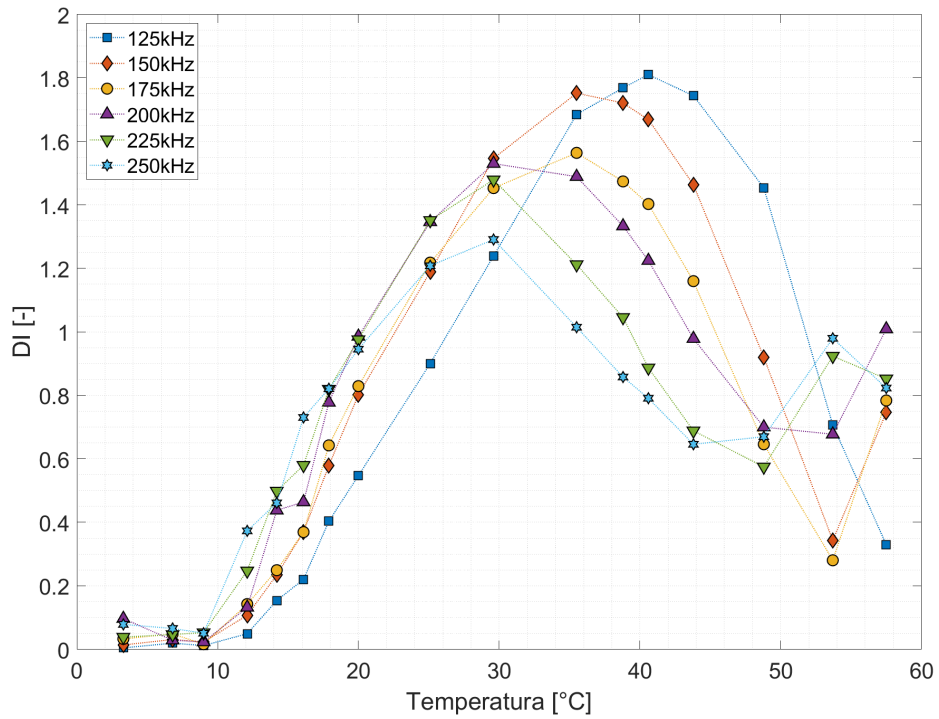
#### 4.3.2.3 Índice de dano coeficiente de diferença de sinal (sdc)

A Figura 29 exibe o índice de dano coeficiente de diferença de sinal versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial e longitudinal.

Figura 29: Índice de dano coeficiente de diferença de sinal versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b).



(a) Sensor na direção circunferencial.



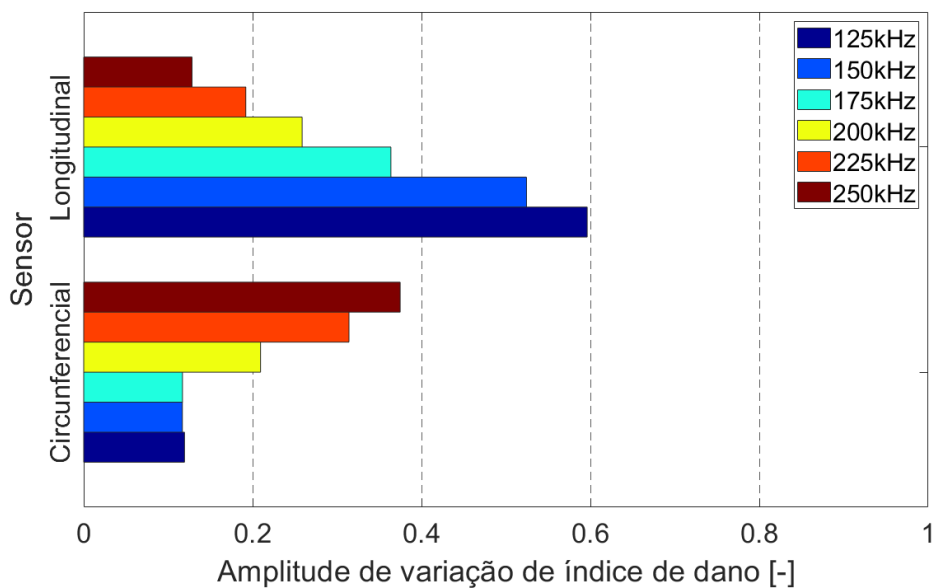
(b) Sensor na direção longitudinal.

Fonte: O AUTOR

Para o sensor na direção circunferencial a Figura 29(a) as frequências de 125 kHz a 200 kHz tiveram um comportamento similar durante boa parte do intervalo de temperatura, principalmente para a faixa de temperatura utilizada durante os ensaios de fadiga, que fica entre 20°C e 30°C, aproximadamente. Porém, para as frequências de 225 kHz e 250kHz, ocorreu uma maior variabilidade dos valores, sobretudo para temperaturas acima de 45°C onde ocorreu uma mudança de concavidade da curva. Já para o sensor na direção longitudinal Figura 29(b) observou-se grande variabilidade dos resultados a partir da temperatura de 30°C, em especial para as frequências maiores, mantendo o comportamento visto nos índices de dano anteriores.

A Figura 30 exibe a medida da amplitude de variação do índice de dano coeficiente de diferença de sinal (*SDC*) entre a faixa de temperatura utilizada nos ensaios de fadigas deste trabalho, mais especificamente entre 24°C a 32°C.

Figura 30: Variação máxima do índice de dano coeficiente de diferença de sinal no intervalo de temperatura entre 24 e 32°C.



Fonte: O AUTOR, 2021

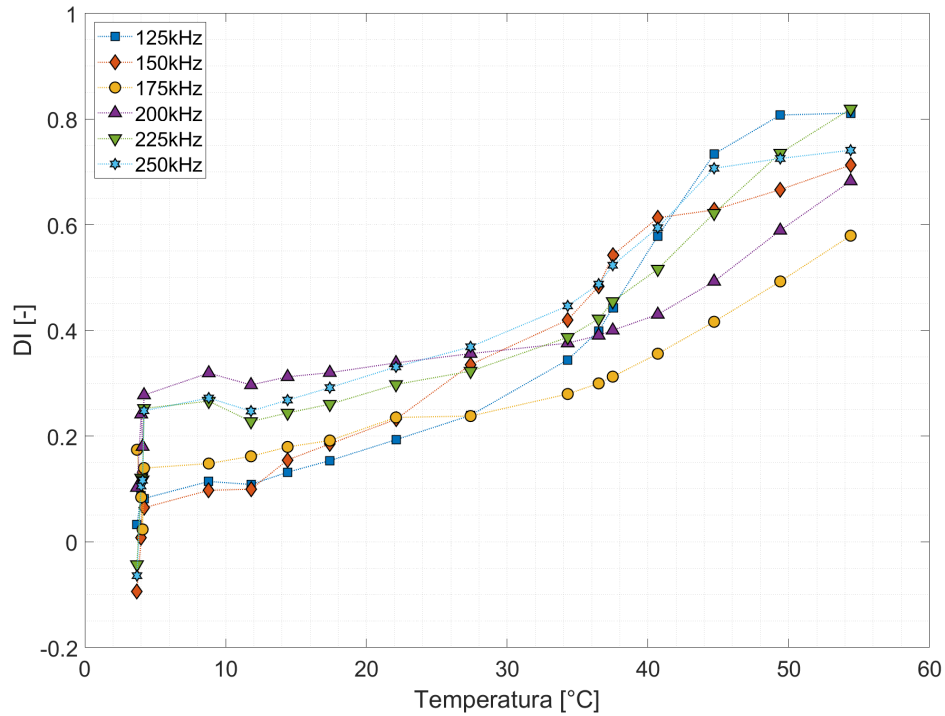
Para o sensor na direção circunferencial, as frequências menores apresentaram menor amplitude de variação em relação a variação de temperatura quando comparadas com as frequências maiores. Devido ao fato dos pontos de inflexão serem acima do intervalo de temperatura de operação (entre 24 e 32°C), os resultados da Figura 30 não foram afetados por essa mudança de concavidade na curva, resultando em uma variação de temperatura proporcional a frequência de emissão. Para o sensor na direção longitudinal, cujos resultados apresentaram maior variabilidade, os resultados de variação de temperatura máxima absoluta apresentaram uma tendência devido a influência dos pontos de inflexão estarem exatamente dentro do intervalo de temperatura do ensaio. Como para as frequência mais baixas o ponto de inflexão foi em temperaturas maiores, ocorreu uma grande variação do índice de dano devido a variação de temperatura. Já para as

frequências mais altas, a variação do índice de dano foi menor devido ao ponto de inflexão que alterou a concavidade da curva gerando uma redução entre os máximos e mínimos para o intervalo de temperatura analisado.

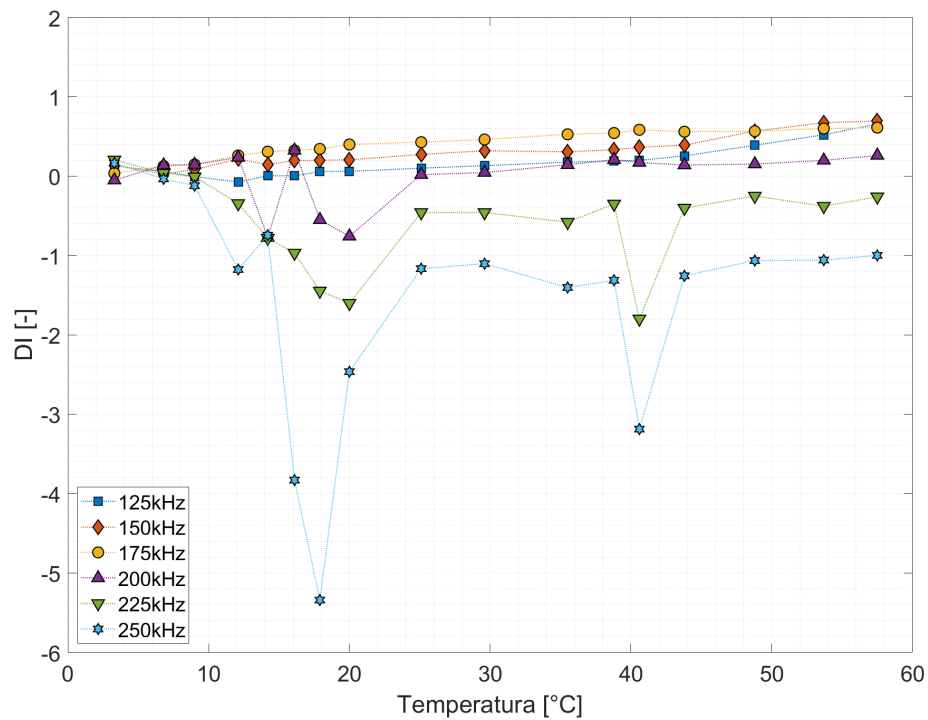
#### *4.3.2.4 Índice de dano perda central de espectro*

A Figura 31 exibe o índice de dano perda central de espectro versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial e longitudinal. Vale salientar que para esse índice o eixo vertical não é o mesmo para as duas figuras, visto que para o sensor na direção longitudinal ocorreu uma variação muito acima da escala para as frequências de 200kHz a 250kHz.

Figura 31: Índice de dano perda central de espectro versus a temperatura em diferentes frequências de emissão para os sensores nas direções circunferencial (a) e longitudinal (b).



(a) Sensor na direção circunferencial.



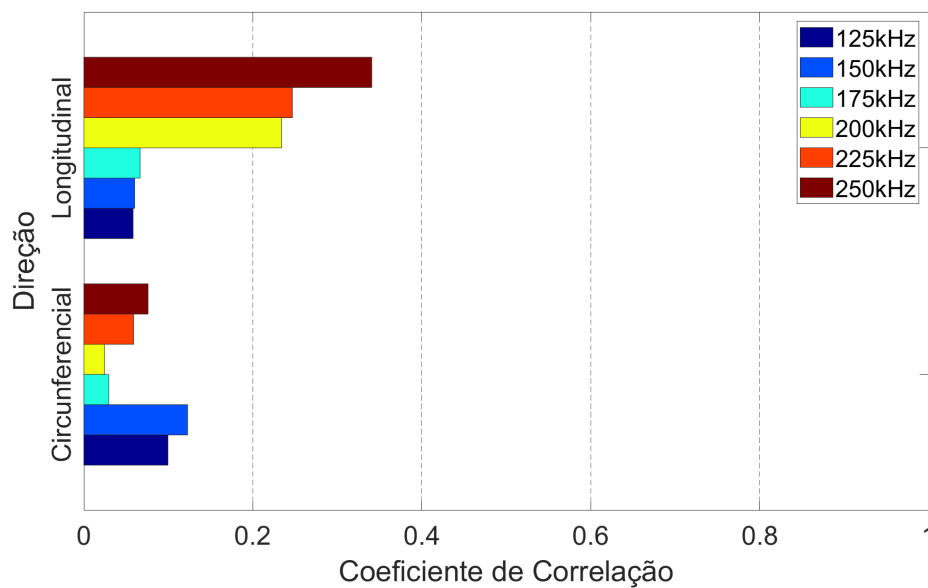
(b) Sensor na direção longitudinal.

Fonte: O AUTOR

Para o sensor na direção circunferencial a Figura 31a todas as frequências tiveram comportamento linear com coeficiente angular positivo para o aumento da temperatura durante todo o intervalo analisado, com uma pequena variação na magnitude entre as medidas. Já para o sensor na direção longitudinal a variabilidade entre as medidas foi maior para as frequências mais altas, não apresentando nenhum tipo de tendência para essas frequências específicas, como poder ser visto na Figura 31b, mantendo o comportamento visto nos índices de dano anteriores. No entanto, para as frequências menores os resultados foram um comportamento linear de coeficiente angular positivo para todo o intervalo de temperatura analisado.

A Figura 32 exibe a medida da amplitude de variação do índice de dano perda central de espectro entre a faixa de temperatura utilizada nos ensaios de fadiga deste trabalho, mais especificamente entre 24°C a 32°C.

Figura 32: Variação máxima do índice de dano perda central de espectro no intervalo de temperatura entre 24 e 32°C.



Fonte: O AUTOR, 2021

Para o sensor na direção circunferencial, cujos resultados apresentaram tendência mais linear, a influência da temperatura foi pequena para todas as frequências de emissão. Para o sensor na direção longitudinal, os resultados de variação de temperatura máxima absoluta apresentaram pequenas variações para as frequências menores. Já para as frequências maiores, cujos resultados apresentaram maior variabilidade, devido a elevada variação nas medidas do índice de dano exatamente no intervalo de temperatura analisado, os resultados não apresentaram nenhuma tendência e valores maiores.

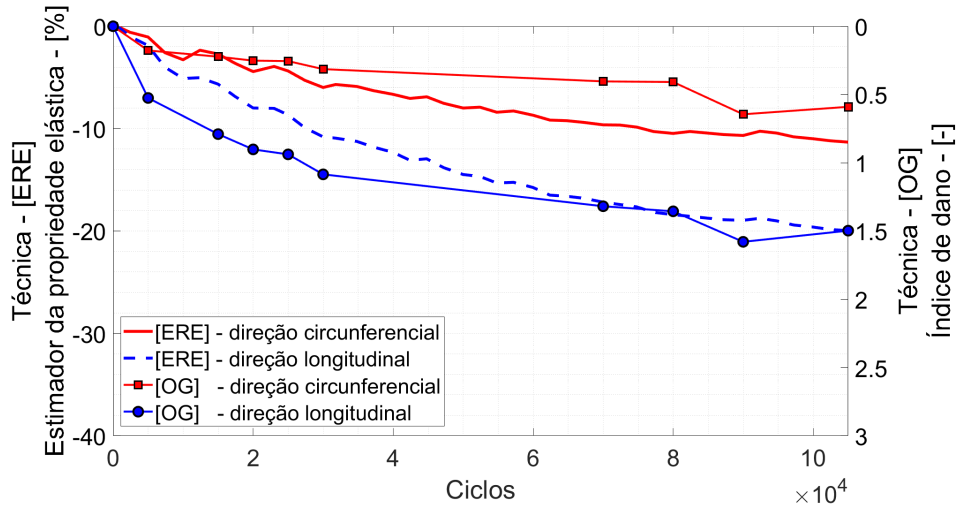
### 4.3.3 Avaliação da influência da fadiga nos índices de dano

Nesta seção serão apresentados dados de ondas guiadas, por meio dos índices de dano, em conjunto com os dados de extensometria de resistência elétrica, pela medida da variação do estimador da propriedade elástica. Para todas as figuras, as linhas contínuas representam os dados de extensometria de resistência elétrica e as linhas com marcadores representam o índice de dano referente ao sinal de onda guiada, em vermelho são os dados para os sensores na direção circunferencial e em azul para os sensores na direção longitudinal. Para facilitar a visualização dos resultados, somente o índice de dano referente ao sinal de ondas guiadas de frequência de 125kHz foi plotado nas Figuras 33 a 36. No entanto, na seção a seguir serão apresentados os resultados de correlação entre os índices de dano e a variação da propriedade elástica para todas as frequências utilizadas nesse estudo. Vale salientar, ainda, que o ensaio A teve 10 inspeções durante a totalidade do ensaio de 105.000 ciclos, já o ensaio B foram feitas 14 inspeções, totalizando 120.000 ciclos.

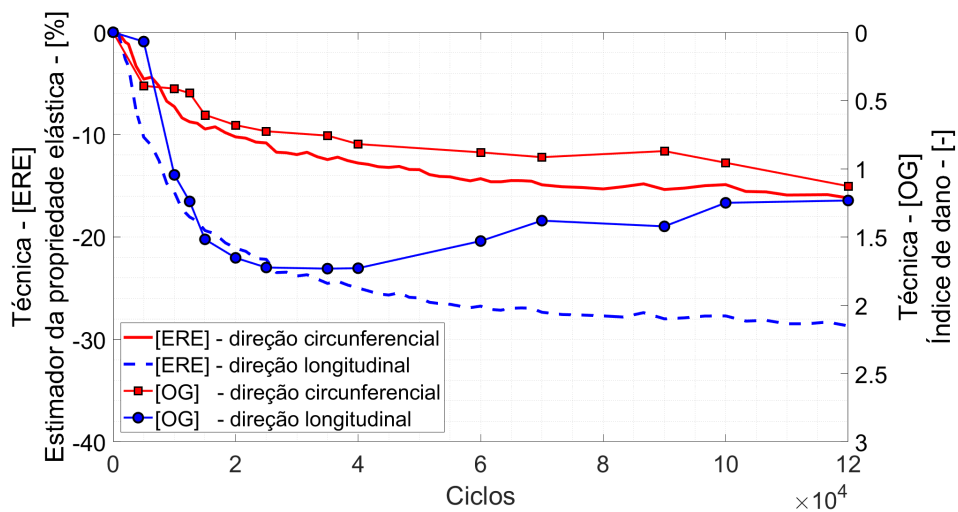
#### 4.3.3.1 Índice de dano relação de energia de Hilbert

A Figura 33 exibe o comportamento do índice de dano relação de energia de Hilbert e a variação do módulo elástico ao longo do número de ciclos do ensaio de fadiga para as amostras A, como mostra a Figura 33a, e B, como mostra a Figura 33b.

Figura 33: Variação percentual do estimador da propriedade elástica calculado a partir técnica de ERE e o índice de dano relação de energia de Hilbert calculado pela técnica de OG versus o número de ciclos, considerando as direções circunferencial e longitudinal.



(a) Amostra A.



(b) Amostra B.

Fonte: O AUTOR

Para esse índice de dano observa-se uma magnitude de oscilação congruente entre o índice de dano e a variação da propriedade elástica, ou seja, entre as técnicas de extensometria de resistência elétrica e ondas guiadas. Mais especificamente, devido a sensibilidade do índice, pode-se dizer que com a queda da propriedade elástica temos uma atenuação entre o sinal monitorado e o sinal como recebido, a relação entre a propriedade mecânica e a atenuação do sinal é de que o tubo está absorvendo mais energia dentro da sua estrutura devido aos mecanismos de dano relacionados a fadiga. Todavia, assim como nos resultados de temperatura apresentados anteriormente, o índice de dano referente ao sensor na direção longitudinal apresenta uma maior variabilidade quando comparado com o sensor na direção circunferencial. Se observarmos a

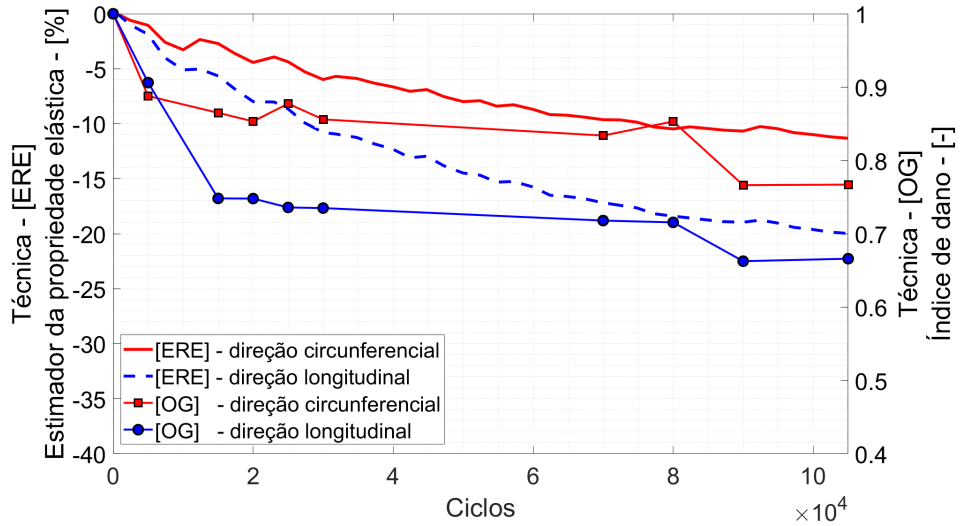


Figura 33 podemos ver que inicialmente, até aproximadamente 40 mil ciclos, tanto os resultados de ERE como os de ondas guiadas apresentaram quedas gradativas nas suas respectivas medidas. Vale ressaltar que para a amostra B o sensor posicionado na direção longitudinal apresentou um aumento após os 40 mil ciclos e no sensor posicionado na circunferencial não. Uma explicação é que podem ocorrer, ao longo do ensaio de fadiga, danos estruturais de grande escala como delaminação e rompimento de fibras no caminho da onda entre os sensores de emissão e recepção, ocasionando variações abruptas ou até mesmo atenuação total do sinal. No entanto, para materiais compósitos laminados, sabemos que delaminações e rompimentos de fibras ocorrem somente no estágio final de degradação por fadiga. Logo, no início do ensaio de fadiga a densidade de trincas transversais aumenta rapidamente e com isso a permeação de água na estrutura laminada inicia. A penetração de água, por ter correlação direta com a densidade de trincas transversais, gera alterações gradativas no sinal de ondas guiadas. Além disso, durante a fadiga pode ocorrer problemas com o adesivo utilizado para acoplamento do sensor piezoelétrico para com a superfície da amostra.

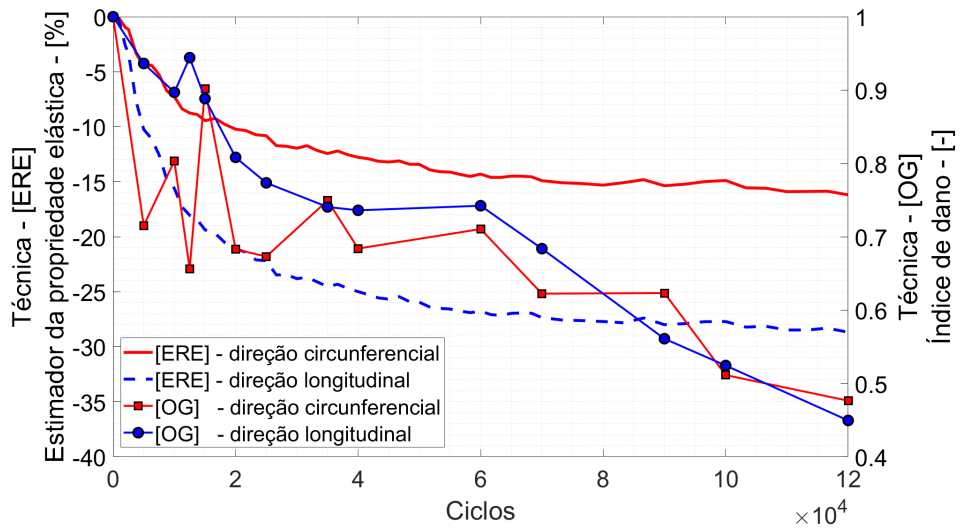
#### *4.3.3.2 Índice de dano correlação cruzada máxima percentual*

A Figura 34 exhibe o comportamento do índice de dano correlação cruzada máxima percentual e a variação do módulo elástico ao longo do número de ciclos do ensaio de fadiga para as amostras A, como mostra a Figura 34a, e B, como mostra a Figura 34b. Vale diferir em relação aos outros índices de dano utilizados nesse trabalho que, devido a sua natureza matemática Equação 18, esse índice apresenta condição como recebido no valor unitário e decresce com o aumento da diferença entre os sinais até o valor de zero.

Figura 34: Variação percentual do estimador da propriedade elástica calculado a partir técnica de ERE versus o índice de dano correlação cruzada máxima percentual calculado pela técnica de OG, considerando as direções circunferencial e longitudinal.



(a) Amostra A.



(b) Amostra B.

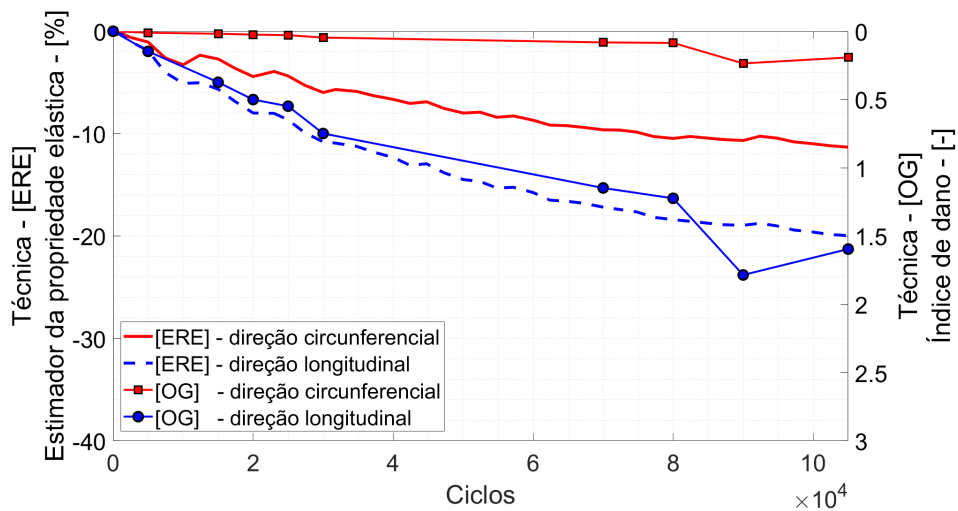
Fonte: O AUTOR

Para esse índice de dano os resultados foram diferentes entre as amostras, uma vez que observa-se variação entre as tendências das amostras A e B em relação ao posicionamento dos sensores. Se tratando da região inicial, para a amostra A o sensor longitudinal teve maior magnitude que o circunferencial durante todo o ensaio. Já para a amostra B o sensor posicionado na circunferencial teve magnitude maior durante o início do ensaio. No entanto, ao final do ensaio as duas direções convergiram para a mesma magnitude, como pode ser visto na Figura 34.

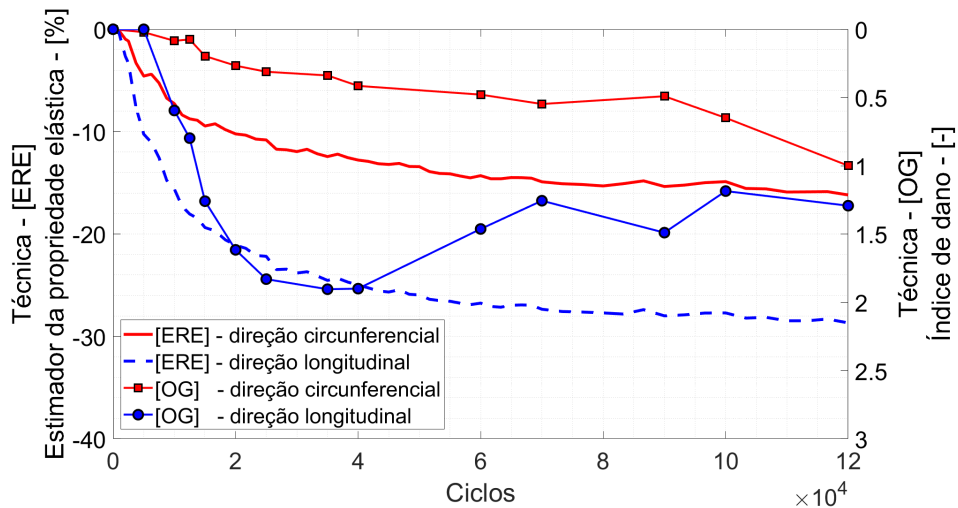
#### 4.3.3.3 Índice de dano coeficiente de diferença de sinal (sdc)

A Figura 35 exibe o comportamento do índice de dano coeficiente de diferença de sinal e a variação do módulo elástico ao longo do número de ciclos do ensaio de fadiga para as amostras A, como mostra a Figura 35a, e B, como mostra a Figura 35b.

Figura 35: Variação percentual do estimador da propriedade elástica calculado a partir técnica de ERE versus o índice de dano coeficiente de diferença de sinal calculado pela técnica de OG, considerando as direções circunferencial e longitudinal.



(a) Amostra A.



(b) Amostra B.

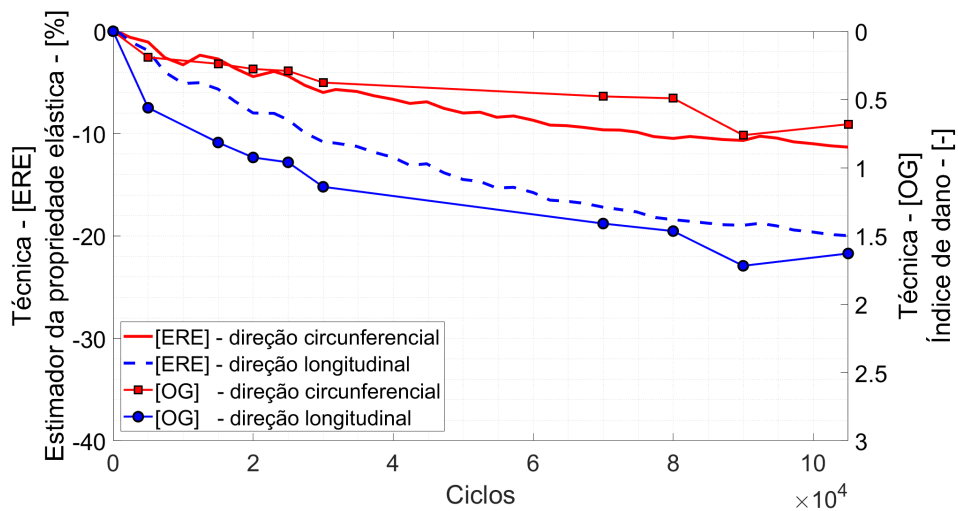
Fonte: O AUTOR

Esse índice de dano teve comportamento similar ao índice de dano relação de energia de Hilbert com uma pequena variação entre as medidas.

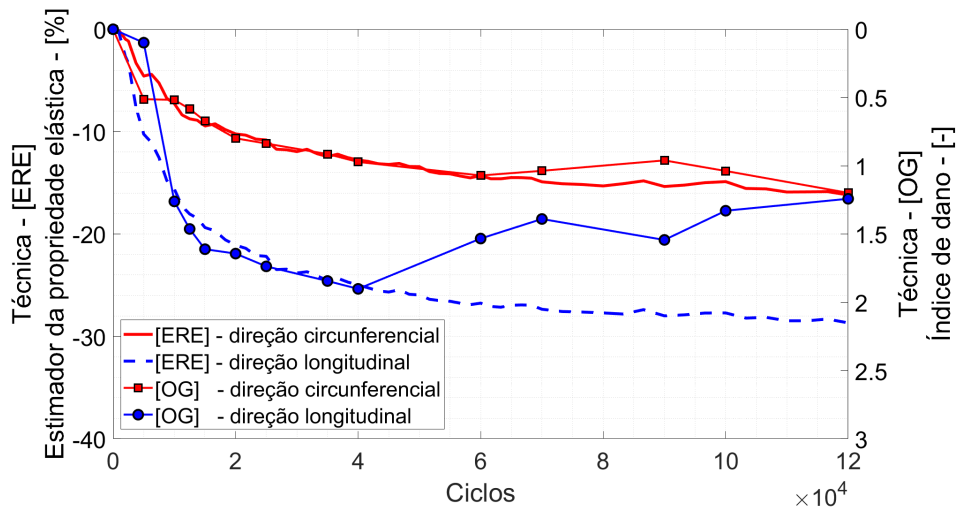
#### 4.3.3.4 Índice de dano perda central de espectro

A Figura 36 exibe o comportamento do índice de dano perda central de espectro e a variação do módulo elástico ao longo do número de ciclos do ensaio de fadiga para as amostras A, como mostra a Figura 36a, e B, como mostra a Figura 36b.

Figura 36: Variação percentual do estimador da propriedade elástica calculado a partir técnica de ERE versus o índice de dano perda central de espectro calculado pela técnica de OG, considerando as direções circunferencial e longitudinal.



(a) Amostra A.



(b) Amostra B.

Fonte: O AUTOR

Se observarmos a Figura 36 podemos ver que o comportamento é muito parecido com o que foi citado anteriormente para o índice de dano relação de energia de Hilbert e o índice de dano SDC.

#### **4.3.4 Avaliação da correlação entre índices de dano e a queda estimador da propriedade elástica.**

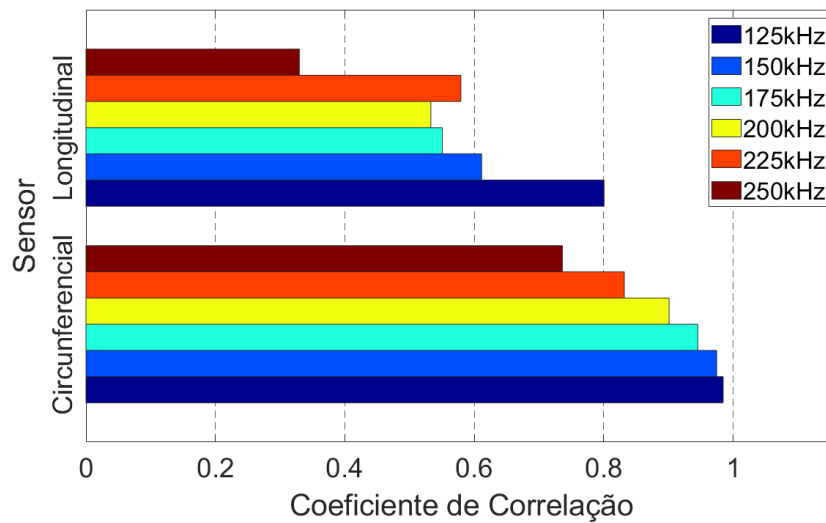
Conforme mostrado na seção anterior, saber a correta sensibilidade de cada índice de dano e qual o melhor para a devida aplicação é de suma importância para otimização de sistemas de avaliação da integridade estrutural. Sendo assim, essa seção tem como objetivo finalizar o estudo exibindo uma comparação entre todos os índices de dano para os sensores nas direções longitudinal e circunferencial nas seis frequências de inspeção utilizadas nesse trabalho. Os resultados serão apresentados em uma seção separada para cada índice, onde cada par de imagem exibirá os ensaios A e B.

O método utilizado para a comparação entre os sinais de ondas guiadas e as medidas de extensometria de resistência elétrica baseou-se na medida de correlação entre ambas as técnicas. Para ser possível comparar, no entanto, devido suas inspeções pontuais, foi necessário interpolar pontos nos sinais de ondas guiadas. Em seguida, a comparação entre conjunto longitudinal e circunferencial foi correlacionada para todas as frequências de inspeção. Para facilitar a visualização, foi utilizado o módulo da correlação evitando que o índice de dano correlação cruzada máxima percentual, que possui correlação negativa com a queda da propriedade elástica, ficasse com valores negativos.

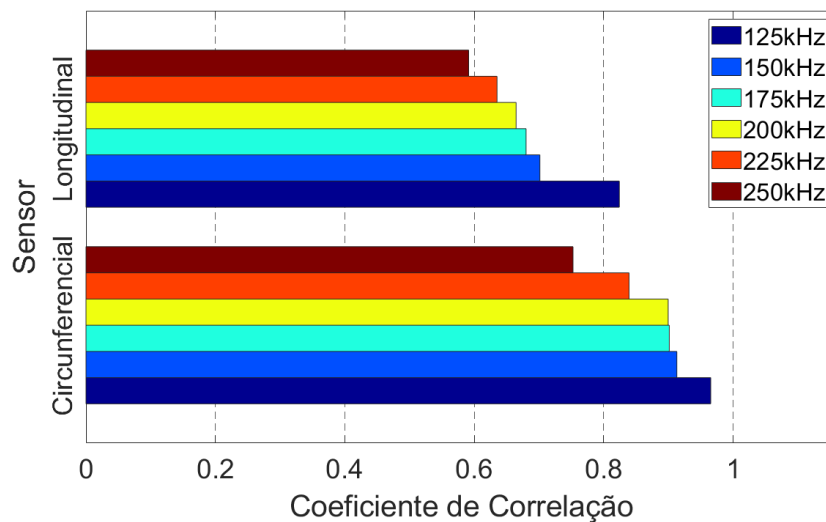
##### *4.3.4.1 Índice de dano relação de energia de Hilbert*

Para o índice de dano relação de energia de Hilbert exibido na Figura 37, os resultados foram conforme o esperado pelos gráficos apresentados na seção anterior. O sensor na direção circunferencial acompanhou melhor a queda da propriedade elástica para todas as frequências de inspeção em ambos os ensaios. Além disso as frequências menores tiveram progressivamente resultados mais satisfatórios que as frequências mais altas. Para o sensor na direção longitudinal somente a frequência de 125kHz obteve resultado satisfatório, com coeficiente de correlação de aproximadamente 0.8 em ambos os ensaios.

Figura 37: Correlação entre o sinal de OG e medida de degradação da propriedade elástica para o índice de dano relação de energia de Hilbert.



(a) Amostra A.



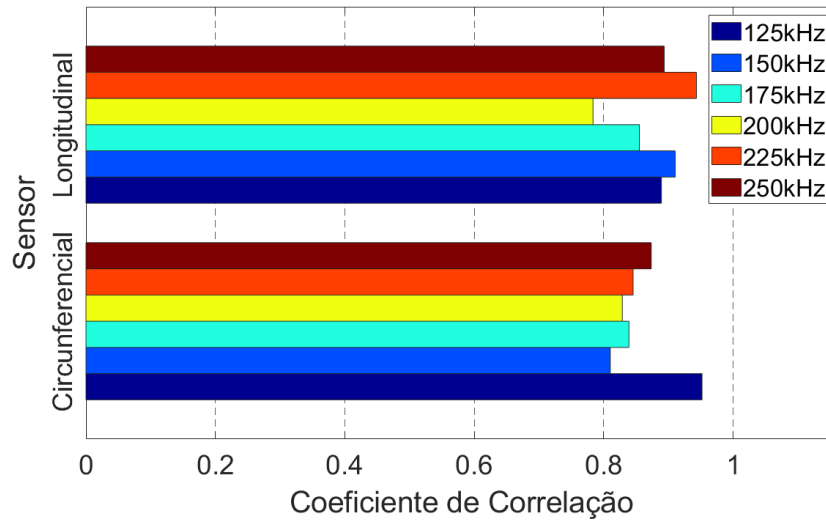
(b) Amostra B.

Fonte: O AUTOR

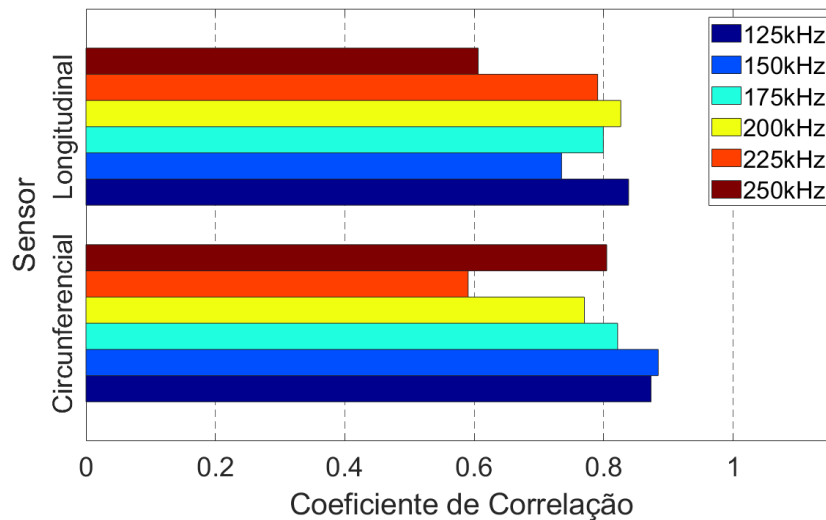
#### 4.3.4.2 Índice de dano correlação cruzada máxima percentual

Para o índice de dano correlação cruzada máxima percentual exibido na Figura 38, os resultados apresentaram uma média de coeficiente de correlação forte para o ensaio A e médio para o ensaio B. Diferindo do índice de dano relação de energia de Hilbert onde as frequências influenciaram de forma gradativa no coeficiente de correlação, para o índice de dano correlação cruzada máxima percentual ambos os sensores, nas direções longitudinal e circunferencial, ficaram com comportamento homogêneo em relação as frequências, com exceção das frequências de 225 e 250kHz para o ensaio B.

Figura 38: Correlação entre o sinal de OG e medida de degradação da propriedade elástica para o índice de dano correlação cruzada máxima percentual.



(a) Amostra A.



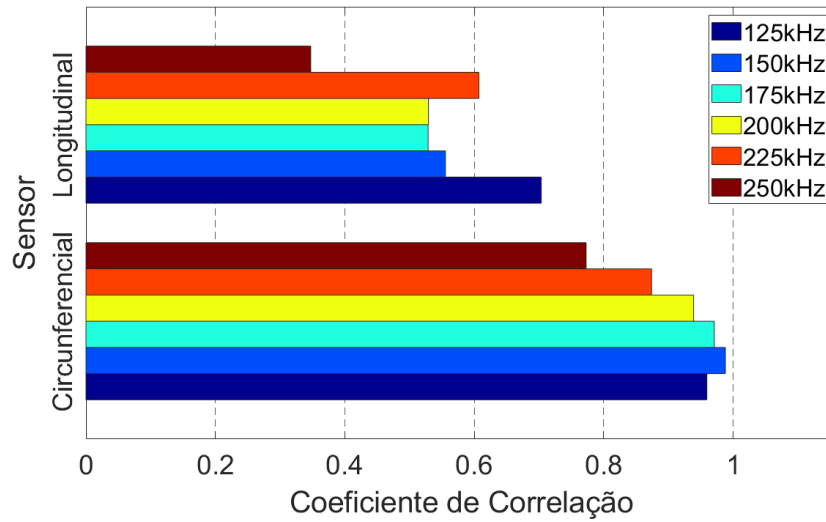
(b) Amostra B.

Fonte: O AUTOR

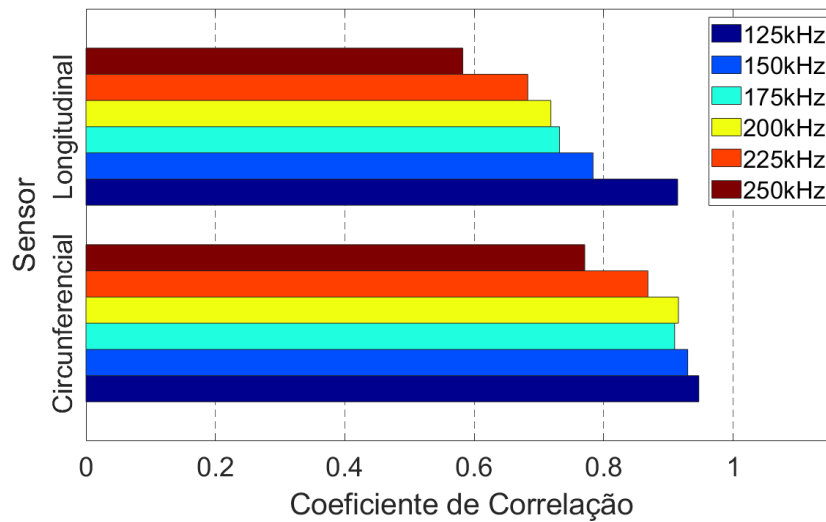
#### 4.3.4.3 Índice de dano coeficiente de diferença de sinal (SDC)

Para o índice de dano coeficiente de diferença de sinal (*sdc*) exibido na Figura 39, os resultados foram similares ao índice de dano relação de energia de Hilbert. O sensor na direção circunferencial acompanhou melhor a queda da propriedade elástica para todas as frequências de inspeção, principalmente para o ensaio A, onde a diferença entre os sensores nas direções longitudinal e circunferencial foi mais acentuada. Além disso, as frequências menores tiveram progressivamente resultados mais satisfatórios que as frequências mais altas.

Figura 39: Correlação entre o sinal de OG e medida de degradação da propriedade elástica para o índice de dano coeficiente de diferença de sinal (*SDC*).



(a) Amostra A.



(b) Amostra B.

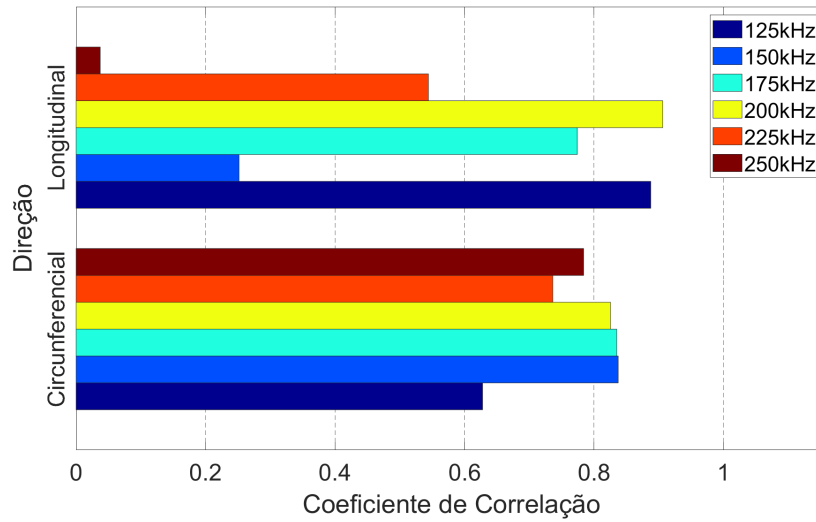
Fonte: O AUTOR

#### 4.3.4.4 Índice de dano perda central de espectro

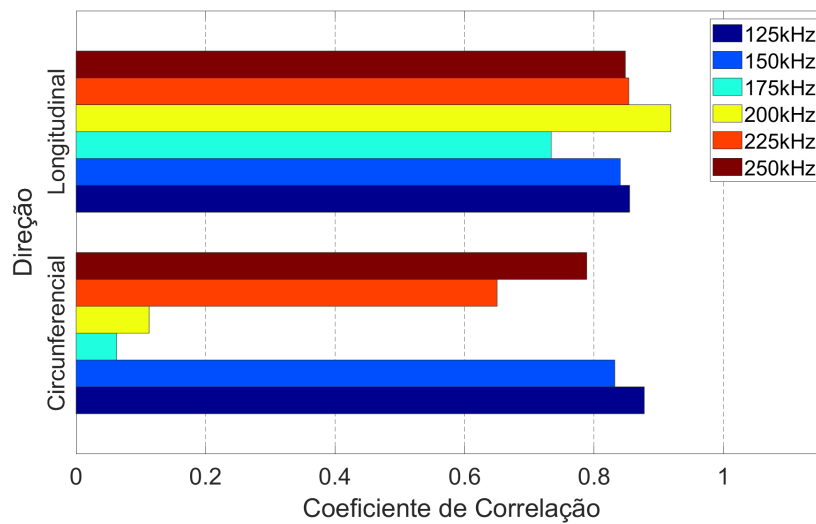
Para o índice de dano perda central de espectro exibido na Figura 40, os resultados foram sem padrão e com grande oscilação entre os valores. Esse resultado era o esperado conforme citado na seção anterior, onde o a Figura 36 exibiu resultados não satisfatórios e com grande dispersão entre medidas.



Figura 40: Correlação entre o sinal de OG e a medida de degradação da propriedade elástica para o índice de dano perda central de espectro.



(a) Amostra A.



(b) Amostra B.

Fonte: O AUTOR

## 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pela técnica de extensimetria de resistência elétrica foi possível observar uma queda do estimador da propriedade elástica ao longo da vida em fadiga do tubo. Conforme esperado o ensaio com maior carregamento teve uma variação negativa de maior magnitude do estimador da propriedade elástica, resultando em uma maior redução da rigidez do tubo para essa amostra. Para ambos ensaios a degradação da rigidez teve maior intensidade para o sensor sensível a variações das deformações na direção longitudinal.

Com os resultados obtidos pode-se verificar que a técnica de ultrassom convencional não foi satisfatória para as condições metodológicas utilizadas neste trabalho, visto que não foi possível observar variação do tempo de voo ao longo do ensaio de fadiga. No entanto, a sapata piramidal desenvolvida para diminuir os efeitos da zona morta proporcionou um melhor acoplamento ao tubo e menor atenuação do sinal.

Para os ensaios de fadiga foi realizado uma comparação entre a variação dos índices de dano extraídos do sinal de ondas guiadas e a variação da propriedade elástica medida pela técnica de extensometria de resistência elétrica. Os resultados obtidos nessa comparação mostraram uma potencial correlação entre a degradação da propriedade elástica e os índices de dano. Além disso, pôde se constatar, também, que a utilização da correta ferramenta de análise do sinal abre oportunidades promissoras e que contribuem para a utilização da técnica de ondas guiadas em sistemas de avaliação da integridade estrutural. Apesar da visível correlação entre os índices de dano e a degradação da propriedade elástica do material sob fadiga, há, no entanto, uma grande incerteza em relação aos diferentes valores que os índices de dano podem assumir sob o mesmo número de ciclos de fadiga. Porém, as distribuições numéricas de diferentes índices de dano são alteradas durante o processo de fadiga, o que indica que a influência da fadiga no sinal de ondas guiadas é descrita de diferentes perspectivas por diferentes índices de dano. No geral, as frequências menores apresentaram maior correlação entre a degradação da propriedade elástica e os índices de dano.

Através da análise do ensaio de temperatura foi possível observar a sensibilidade à temperatura para cada índice de dano. Apesar de ter sido utilizado o intervalo de temperatura de interesse, os resultados apresentam curvas com a variação de cada índice desde 3°C até 60°C, aproximadamente. Além disso, a influência da frequência de emissão, assim como para o ensaio

de fadiga, foi avaliada para a variação de temperatura.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o campo acústico por meio de ensaios de interferometria.
- Aprofundar a análise da vida em fadiga dos sensores através de um estudo relacionado ao envelhecimento da resina de acoplamento.
- Ampliar o número de sensores variando a configuração de emissão e recepção entre eles.
- Aprofundar a análise da vida em fadiga dos tubos de PRFV através de um maior número de ensaios com diferentes amplitudes de carregamento.
- Avaliar diferentes índices de dano como inputs em algoritmos de machine learning com o objetivo de realizar decisões guiadas em avaliação da integridade estrutural.

## REFERÊNCIAS

- AN, Y.-K.; KIM, M.; SOHN, H. Piezoelectric transducers for assessing and monitoring civil infrastructures. In: WANG, M.; LYNCH, J.; SOHN, H. (Ed.). *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2014, (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, v. 55). p. 86–120. ISBN 978-0-85709-432-2.
- ASHFORTH, C.; ILCEWICZ, L. Certification and compliance considerations for aircraft products with composite materials. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2017. ISBN 9780128035818.
- ASTM. 597 - standard test method for pulse velocity through concrete. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2009.
- AULD, B. *Acoustic fields and waves in solids*. Wiley, 1973. (A Wiley-Interscience publication). ISBN 9785885013437. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=\\\_2MWAwAAQBAJ](https://books.google.com.br/books?id=\_2MWAwAAQBAJ)>.
- BACKUS, G. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. *Journal of Geophysical Research*, v. 67, p. 4427–4440, 1962.
- BOERI, D. V. *Caracterização de materiais compostos por ultra-som*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.
- BRAGA, R. M. d. *Medição da camada de óxidos em tubos de superaquecedores de caldeiras aquatubulares por ultrassom*. Tese (Doutorado) — PPGEM/UFRS, Porto Alegre/Rio Grande do Sul/Brasil, 2009.
- CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. *Materials Science and Engineering*. [S.l.]: Wiley, 2014. ISBN 9781118319222.
- CAMPBELL, F. *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 9788578110796.
- CHENG, J.-W. et al. Attenuation of guided wave propagation by the insulation pipe. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 978-953-51-0411-7.
- DE LUCA, A. et al. Guided wave SHM system for damage detection in complex composite structure. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Elsevier, v. 105, n. May 2019, p. 102408, 2020. ISSN 01678442. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102408>>.
- DEMMA, A. The Interaction of Guided Waves with Discontinuities in Structures. *Mechanical Engineering*, n. January, 2003.

DIN. 1319 - *Basic concepts in metrology - General concepts*. [S.l.], 1995.

DODIUK, H.; GOODMAN, S. H. *Handbook of Thermoset Plastics*. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9781455731077.

DYER, K.; ISAAC, D. Fatigue behaviour of continuous glass fibre reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 29, n. 6, p. 725–733, 1998. ISSN 1359-8368. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836898000328>>.

EL-SABBAGH, A.; STEUERNAGEL, L.; ZIEGMANN, G. Characterisation of flax polypropylene composites using ultrasonic longitudinal sound wave technique. *Composites Part B: Engineering*, v. 45, n. 1, p. 1164–1172, 2013. ISSN 1359-8368. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812003939>>.

EMMANUEL LIZÉ. *Détection d'endommagement sans état de référence et estimation de la température pour le contrôle santé intégré de structures composites par ondes guidées*. Tese (Doutorado) — École doctorale Sciences des métiers de l'ingénieur (Paris), 2018. Disponível em: <<http://www.theses.fr/2018ENAM0058>>.

ENSMINGER, D.; BOND, L. J. *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. [S.l.]: CRC press, 2011.

ERDEN, S. et al. Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification. *Fibers and Polymers*, 2010. ISSN 12299197.

FENZA, A. D.; SORRENTINO, A.; VITIELLO, P. Application of artificial neural networks and probability ellipse methods for damage detection using lamb waves. *Composite Structures*, v. 133, p. 390 – 403, 12 2015.

GELLERT, E.; TURLEY, D. Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 30, n. 11, p. 1259–1265, nov 1999. ISSN 1359-835X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X99000378>>.

GENOVES, V. et al. Ultrasonic characterization of grc with high percentage of fly ash substitution. *Ultrasonics*, p. –, 03 2015.

GHOLIZADEH, S. A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, v. 1, p. 50–57, 2016. ISSN 2452-3216. XV Portuguese Conference on Fracture, PCF 2016, 10-12 February 2016, Paco de Arcos, Portugal. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321616000093>>.

GIURGIUTIU, V. *Structural health monitoring of aerospace composites*. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 9780124104419.

GRAFF, K. F. *Karl F Graff - Wave motion in elastic solids-Ohio State University Press (1975)*. [S.l.: s.n.], 1975.

HARRI, K.; GUILLAUME, P.; VANLANDUIT, S. On-line damage detection on a wing panel using transmission of multisine ultrasonic waves. *NDT & E International*, v. 41, p. 312–317, 06 2008.

HODGKINSON, J.; DIAMANTI, K.; SOUTIS, C. Lamb waves for the non-destructive inspection of monolithic and sandwich composite beams. In: . [S.l.: s.n.], 2003.

HOFFMANN, K. *An Introduction to Measurement Using Strain Gages*. Hottinger Baldwin, 1989. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=7thNHQAACAAJ>>.

HULL, D.; CLYNE, T. W. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 9781139170130.

HUMMEL, R. *Electronic Properties of Materials*. Springer New York, 2011. (SpringerLink : Bücher). ISBN 9781441981646. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=TsHFou6RftkC>>.

JIADONG, H.; LIN, J.; ZENG, L. High-resolution damage detection based on local signal difference coefficient model. *Structural Health Monitoring*, v. 14, 01 2015.

JOLLIVET, T.; PEYRAC, C.; LEFEBVRE, F. Damage of Composite Materials. *Procedia Engineering*, v. 66, p. 746–758, 2013. ISSN 1877-7058. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813019619>>.

JOSEPH, P. V.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Short sisal fiber reinforced polypropylene composites: The role of interface modification on ultimate properties. *Composite Interfaces*, 2002. ISSN 09276440.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. *Manufacturing engineering and technology (5th ed.)*. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 9780201361315.

KARABUTOV, A.; PODYMOVA, N. Quantitative analysis of the influence of voids and delaminations on acoustic attenuation in cfrp composites by the laser-ultrasonic spectroscopy method. *Composites Part B: Engineering*, v. 56, p. 238–244, 2014. ISSN 1359-8368. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813004484>>.

KEIL, S. *Technology and practical use of strain gages: with particular consideration of stress analysis using strain gages*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.

KESSLER, S. S.; SPEARING, S. M.; SOUTIS, C. Damage detection in composite materials using lamb wave methods. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 11, n. 2, p. 269–278, apr 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/2/310>>.

KHAN, M. N. et al. Comparative studies of mechanical and interfacial properties between jute and e-glass fiber-reinforced polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 29, p. 1078–1088, 07 2010.

LEINOV, E.; LOWE, M. J.; CAWLEY, P. Investigation of guided wave propagation and attenuation in pipe buried in sand. *Journal of Sound and Vibration*, v. 347, p. 96–114, 2015. ISSN 0022-460X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X1500190X>>.

LEMISTRE, M.; BALAGEAS, D. Structural health monitoring system based on diffracted lamb wave analysis by multiresolution processing. *Smart Materials and Structures*, v. 10, p. 504, 06 2001.

LISSENDEN, C. et al. Internal damage detection in a laminated composite plate using ultrasonic guided waves. In: *AIP Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 894, p. 1029–1035. ISBN 9780735403994.

LIU, Z.; OSWALD, J.; BELYTSCHKO, T. Xfem modeling of ultrasonic wave propagation in polymer matrix particulate/fibrous composites. *Wave Motion*, v. 50, n. 3, p. 389–401, 2013. ISSN 0165-2125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165212512001357>>.

LOEWENSTEIN, K. *The manufacturing technology of continuous glass fibres*. Elsevier, 1973. ISBN 9780444411099. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=151ZAAAAMAAJ>>.

LOWE, M.; ALLEYNE, D.; CAWLEY, P. Mode conversion of guided waves by defects in pipes. In: \_\_\_\_\_. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume 16A*. Boston, MA: Springer US, 1997. p. 1261–1268.

LU, Y. et al. Artificial neural network (ann)-based crack identification in aluminum plates with lamb wave signals. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 20, n. 1, p. 39–49, 2009.

MANSON, G.; WORDEN, K.; ALLMAN, D. Experimental validation of a structural health monitoring methodology. part iii. damage location on an aircraft wing. *Journal of Sound and Vibration - J SOUND VIB*, v. 259, p. 365–385, 01 2003.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. *Composite materials: Engineering and Science*. [S.l.: s.n.], 1994. ISSN 02613069.

MAYWORM, R.; COSTA-FELIX, R.; ALVARENGA, A. Aspectos metrologicos da técnica tempo de voo da onda difratada (tofd) para utilizacao em ensaios não destrutivos (ends) por ultrassom. *Soldagem & Inspeção*, v. 21, 01 2017.

MICHAELS, J.; MICHAELS, T. An integrated strategy for detection and imaging of damage using a spatially distributed array of piezoelectric sensors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v. 6532, 05 2007.

MIDDELHOEK, S. et al. Silicon sensors. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 6, n. 12, p. 1641–1658, dec 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0957-0233/6/12/001>>.

MILEWSKI, J. V.; ROSATO, D. V. History of reinforced plastics. In: . [S.l.]: Taylor & Francis, 1981. v. 15, n. 7, p. 1303–1343.

MUFTAH, M.; HARIS, S. A strain gauge based system for measuring dynamic loading on a rotating shaft. *International Journal of Mechanics*, v. 5, p. 19–26, 01 2011.

MUKHOPADHYAY, S.; ADAK, B. *Single-Polymer Composites*. CRC Press, 2018. ISBN 9781351272247. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781351272247>>.

MURRAY, W.; MILLER, W. *The Bonded Electrical Resistance Strain Gage: An Introduction*. Oxford University Press, 1992. ISBN 9780195344967. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ODLm4wuW1FsC>>.



- NAYFEH, A. H. *Wave propagation in layered anisotropic media: With application to composites*. [S.l.]: Elsevier, 1995.
- OGIN, S.; SMITH, P.; BEAUMONT, P. Matrix cracking and stiffness reduction during the fatigue of a (0/90)s gfrp laminate. *Composites Science and Technology*, v. 22, n. 1, p. 23–31, 1985. ISSN 0266-3538.
- OWEN, M. J.; MIDDLETON, V.; JONES, I. A. *Integrated design and manufacture using fibre-reinforced polymeric composites*. [S.l.: s.n.], 2000.
- QING, X. P. et al. An active diagnostic system for structural health monitoring of rocket engines. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 17, n. 7, p. 619–628, 2006.
- RADZIENSKI, M. et al. Damage identification in various types of composite plates using guided waves excited by a piezoelectric transducer and measured by a laser vibrometer. *Sensors*, v. 19, p. 1958, 04 2019.
- REIFSNIDER, K. Fatigue behavior of composite materials. *International Journal of Fracture*, 1980. ISSN 03769429.
- RESCALVO, F. et al. Monitoring of carbon fiber-reinforced old timber beams via strain and multiresonant acoustic emission sensors. *Sensors*, v. 18, p. 1224, 04 2018.
- RICHARDSON, T.; LOKENSGARD, E. *Industrial Plastics: Theory and Applications*. Thomson Delmar Learning, 2004. ISBN 9781401804695. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=RSNoaMvY5EoC>>.
- ROJEK, M.; STABIK, J.; WRABEL, G. Ultrasonic methods in diagnostics of epoxy–glass composites. *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL*, v. 162, p. 121–126, 05 2005.
- ROSE, J. L. *Ultrasonic guided waves in solid media*. [S.l.: s.n.], 2014. v. 9781107048. 1–512 p. ISBN 9781107273610.
- ROYER, D.; DIEULESAINT, E. *Elastic waves in solids I: Free and guided propagation*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1999.
- RYTTER, A. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Tese (Doutorado) — Aalborg University, Denmark, 1993. Ph.D. Thesis defended publicly at the University of Aalborg, April 20, 1993 PDF for print: 206 pp.
- SANTONI, G. et al. Lamb wave-mode tuning of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring. *Journal of Vibration and Acoustics*, v. 129, 12 2007.
- SANTOS, M. J. S. F. d. *Ondas ultra-sonoras guiadas na caracterização e controlo não destrutivo de materiais*. Tese (Doutorado) — Universidade de Coimbra Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2004.
- SILVA, R. A. d. F. e. *Estudo Numrico E Experimental Visando O Desenvolvimento De Dutos Compsitos Submarinos Pela Tcnica De Enrolamento Filamentar*. Dissertação (Mestrado) — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- SOKOLOV, S. Ultrasonic oscillations and their applications. *Technical Physics of the USSR*, 1935.

- SORRENTINO, A.; FENZA, A. D. Improved elliptical triangulation method for damage detection in composite material structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 231, 11 2016.
- SU, Z.; YE, L. Digital damage fingerprints (ddf) and its application in quantitative damage identification. *Composite Structures*, v. 67, p. 197–204, 02 2005.
- SU, Z.; YE, L. *Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 48. ISBN 978-1-84882-783-7.
- SU, Z.; YE, L.; LU, Y. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. *Journal of Sound and Vibration*, v. 295, n. 3, p. 753–780, 2006. ISSN 0022-460X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X0600109X>>.
- TALREJA, R.; PHAN, N. Assessment of damage tolerance approaches for composite aircraft with focus on barely visible impact damage. *Composite Structures*, v. 219, p. 1–7, 2019. ISSN 0263-8223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319303150>>.
- TALREJA, R.; SINGH, C. V. *Damage and failure of composite materials*. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 9781139016063.
- TORKAMANI, S. et al. A novel damage index for damage identification using guided waves with application in laminated composites. *Smart Materials and Structures*, v. 23, n. 9, 2014. ISSN 1361665X.
- TOWSYFYAN, H. et al. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures. *Chinese Journal of Aeronautics*, Elsevier, oct 2019. ISSN 1000-9361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936119303474>>.
- VALDEZ, D. A structural health monitoring system for laminated composites. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, v. 6, p. 2013–2021, 2001.
- WALL, H.; WADSÖ, L. Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment. *Marine Structures*, v. 33, p. 21–32, 2013. ISSN 0951-8339. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833913000336>>.
- WANG, B. et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 12, 02 2020.
- WILCOX, P. D. Guided-wave array methods. In: \_\_\_\_\_. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. American Cancer Society, 2009. ISBN 9780470061626. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470061626.shm016>>.
- WOLOSHYN, I. Industrial ultrasonics in the u.s.s.r. *Ultrasonics*, v. 1, n. 1, p. 14–26, 1963. ISSN 0041-624X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X63901136>>.
- XU, L. et al. Guided wave-convolutional neural network based fatigue crack diagnosis of aircraft structures. *Sensors (Switzerland)*, v. 19, n. 16, 2019. ISSN 14248220.
- ZHU, Y. et al. Design, fabrication and stiffness analysis of a novel gfrp sandwiched pipe with stiffened core. *Thin-Walled Structures*, v. 156, p. 106982, 2020. ISSN 0263-8231. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823120308594>>.