



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DE DANO EM VIGAS DE  
FIBRA DE VIDRO E RESINA EPÓXI VIA  
MÉTODO BASEADO EM VIBRAÇÕES**

**ANDRÉ LUIZ AMANCIO**

**JOINVILLE, SC**  
**2019**



**ANDRÉ LUIZ AMANCIO**

**ANÁLISE DE DANO EM VIGAS DE FIBRA DE VIDRO E RESINA EPÓXI VIA  
MÉTODO BASEADO EM VIBRAÇÕES**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

**JOINVILLE, SC**

**2019**



ANDRÉ LUIZ AMANCIO

**ANÁLISE DE DANO EM VIGAS DE FIBRA DE VIDRO E RESINA EPÓXI VIA  
MÉTODO BASEADO EM VIBRAÇÕES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC0001) do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

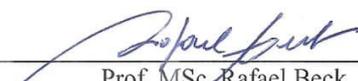
**Banca Examinadora:**

Orientador:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo de Medeiros  
UDESC/CCT

Membros:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eduardo Lenz Cardoso  
UDESC/CCT

  
\_\_\_\_\_  
Prof. MSc. Rafael Beck  
UDESC/CCT

Joinville, 04 de julho de 2019.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ser o sustento, a força e motivo da minha alegria.

Aos meus pais, por me educarem no caminho em que eu deveria andar e sempre estarem ao meu lado na minha vida acadêmica e profissional.

Ao meu irmão, pelo companheirismo e parceria nos estudos.

À minha futura esposa, pela compreensão e palavras de ânimo e encorajamento.

Aos meus amigos e colegas de turma, por toda a ajuda, incentivo e companheirismo nos estudos.

Ao professor Dr. Ricardo de Medeiros, por repartir seu conhecimento durante todo o curso, e especialmente como meu orientador, dando todo o suporte e ajuda nas dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Eduardo Lenz Cardoso, pela contribuição em meu desenvolvimento acadêmico, através de seus ensinamentos durante a Iniciação Científica.

Aos laboratórios de Caracterização Mecânica (SENAI) e Vibrações (UDESC), pela disposição e auxílio para realizar os ensaios experimentais necessários neste trabalho. Ao suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC (2017TR1747 e 2017TR784).



## RESUMO

O Monitoramento de Integridade Estrutural (do inglês *Structural Health Monitoring* – SHM) tem grande importância na engenharia e tem sido mais explorado e desenvolvido ao longo dos últimos anos. Ele é empregado com o intuito de prever falhas e otimizar as manutenções em estruturas. Os materiais compósitos têm sido cada vez mais utilizados em aplicações críticas, como a indústria aeronáutica, devido a possibilidade de se conseguir propriedades melhoradas que um único material não é capaz de apresentar. Através da aplicação de metodologias de detecção de dano é possível verificar alterações na resposta dinâmica de uma estrutura e identificar a presença de dano. Diante disso, este trabalho tem por objetivo avaliar algumas técnicas de detecção de dano aplicada a uma estrutura de material compósito. A metodologia envolve a utilização de um sistema piezoelétrico para a avaliação das estruturas, métodos baseados em vibrações para a análise de diferentes condições de dano e implementação numérica para a interpretação dos dados e cálculos dos índices de dano. Para a análise de detecção de dano, vigas de fibra de vidro/epóxi são utilizadas, contendo 4 condições de dano: intacta, e três diferentes níveis de delaminação. As Funções de Resposta em Frequência são obtidas através de testes baseados em vibrações. É realizada a análise modal computacional da estrutura através de um modelo feito em *software*. Através da implementação numérica dos métodos de detecção de dano, os dados são interpretados e calcula-se os índices de dano. Todos os métodos são analisados e comparados, verificando a influência que a delaminação presente nas vigas causa em cada índice. Um modelo computacional também é utilizado para se comparar os resultados experimentais com os computacionais. Por fim, são discutidas as vantagens e limitações dos métodos aplicados para a detecção de dano em estruturas.

**Palavras-Chave:** Detecção de dano, materiais compósitos, implementação numérica, monitoramento de integridade estrutural (SHM), índice de dano.



## ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) has great importance in the engineering and has been more explored and developed over the last few years. It is used in order to predict failures and optimize maintenance on structures. Composite materials have been increasingly used in critical applications, such as the aeronautical industry, due to the possibility of obtaining improved properties that a single material cannot provide. Through the application of damage detection methodologies, it is possible to verify changes in the dynamic response of a structure and to identify the presence of damage. Therefore, this work aims to evaluate some techniques of damage detection applied to a composite structure. The methodology includes the use of a piezoelectric system for the evaluation of structures, vibration-based methods for the analysis of different damage states and numerical implementation for the interpretation of data and calculations of damage index. For damage detection analysis, glass-fiber/epoxy beams are used, containing four damage conditions: intact and three different levels of delamination. Frequency Response Functions are obtained through vibration-based tests. The computational modal analysis of the structure is performed through a software model. Through the numerical implementation of the damage detection methods, the data are interpreted and the damage indexes are calculated. All the methods are analyzed and compared with each other, verifying the influence that the delamination present in the beams causes in each damage index. A computational model is also used to compare experimental and computational results. Finally, the benefits and limitations of the methods applied to the detection of structural damage are discussed.

**Keywords:** Damage detection, composite material, numerical implementation, structural health monitoring, damage index.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 2.1</b> – Sistema de um grau de liberdade. ....	24
<b>Figura 3.1</b> – Layout do processo de fabricação VARTM .....	36
<b>Figura 3.2</b> – Vigas de compósito: Quatro condições de dano. ....	37
<b>Figura 3.3</b> – Configuração do sistema experimental. ....	37
<b>Figura 3.4</b> – Posição do acelerômetro e posição de excitação na viga. ....	38
<b>Figura 3.5</b> – Configuração da análise modal. ....	38
<b>Figura 3.6</b> – Modelo de viga dupla com delaminação. ....	39
<b>Figura 3.7</b> – Modelo criado no Hypermesh. ....	40
<b>Figura 3.8</b> – Malhas com diferentes níveis de refinamento. ....	41
<b>Figura 3.9</b> – Convergência da Malha .....	42
<b>Figura 3.10</b> – Fluxograma representando a metodologia científica utilizada .....	44
<b>Figura 4.1</b> – Primeiro modo de vibrar da estrutura. ....	45
<b>Figura 4.2</b> – Segundo modo de vibrar da estrutura. ....	46
<b>Figura 4.3</b> – Terceiro modo de vibrar da estrutura. ....	46
<b>Figura 4.4</b> – Quarto modo de vibrar da estrutura. ....	46
<b>Figura 4.5</b> – Quinto modo de vibrar da estrutura. ....	47
<b>Figura 4.6</b> – Sexto modo de vibrar da estrutura. ....	47
<b>Figura 4.7</b> – $DI_M$ de amostra Intacta 1 com as 15 amostras de Dano 1 para os dois pontos de aplicação da força. ....	48
<b>Figura 4.8</b> – $DI_M$ de amostra Intacta 1 com as 15 amostras de Dano 1. ....	49
<b>Figura 4.9</b> – Comparação de seis métodos para a amostra Intacta 1 com as 15 amostras de Dano 1. ....	49
<b>Figura 4.10</b> – Distribuição percentual dos índices – Amostras Intactas. ....	50
<b>Figura 4.11</b> – Distribuição percentual dos índices – Amostras Dano 1. ....	50
<b>Figura 4.12</b> – Distribuição percentual dos índices – Amostras Dano 2. ....	51
<b>Figura 4.13</b> – Distribuição percentual dos índices – Amostras Dano 3. ....	51
<b>Figura 4.14</b> – $DI_M$ – Valor médio das amostras danificadas para cada amostra intacta. ....	52
<b>Figura 4.15</b> – $DI_M$ – Valor médio das amostras intactas para cada amostra danificada. ....	52
<b>Figura 4.16</b> – Comparação dos índices de dano entre métodos. ....	53
<b>Figura 4.17</b> – Índices de dano – (a) $DI_{MS}$ e (b) $DI_{MCS}$ . ....	54

<b>Figura 4.18</b> – Índices de dano para os 3 danos - $DI_{GAP}$ . .....	54
<b>Figura 4.19</b> – Novos valores de índice de dano para cinco métodos – $H_{11}$ . .....	56
<b>Figura 4.20</b> – Novos valores de índice de dano para cinco métodos – $H_{21}$ . .....	57
<b>Figura 4.21</b> – Novos índices de dano – (a) $DI_{MS}$ ; (b) $DI_{MSCS}$ ; (c) $DI_{GAP}$ . .....	58
<b>Figura 4.22</b> – Comparação entre $H_{11}$ e $H_{21}$ - Dano 1. ....	58
<b>Figura 4.23</b> – Comparação entre $H_{11}$ e $H_{21}$ - Dano 2. ....	59
<b>Figura 4.24</b> – Comparação entre $H_{11}$ e $H_{21}$ - Dano 3. ....	59
<b>Figura 4.25</b> – $DI_{ABS}$ - Comparação entre dados experimentais e computacionais. ....	60
<b>Figura 4.26</b> – $DI_M$ - Comparação entre dados experimentais e computacionais. ....	60
<b>Figura 4.27</b> – $DI_{GAP}$ - Comparação entre dados experimentais e computacionais. ....	61
<b>Figura 4.28</b> – $DI_{ABS}$ - Comparação entre a média dos DI e o DI para a FRF média – Posição $H_{11}$ . .....	62
<b>Figura 4.29</b> – $DI_{ABS}$ - Comparação entre a média dos DI e o DI para a FRF média – Posição $H_{21}$ . .....	62
<b>Figura 4.30</b> – Evolução do índice de dano $DI_{ABS}$ – (a) Experimental; (b) Computacional. ...	63
<b>Figura 4.31</b> – Comparação da evolução de $DI_{ABS}$ experimental e computacional. ....	63
<b>Figura A.1</b> – FRFs experimentais para todas as condições de dano: posição $H_{11}$ .....	70
<b>Figura A.2</b> – FRFs experimentais para todas as condições de dano: posição $H_{21}$ .....	71

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> – Dimensões médias e desvios médios das vigas de fibra de vidro/epóxi.....	36
<b>Tabela 3.2</b> – Propriedades geométricas e mecânicas: simulação numérica.....	40
<b>Tabela 4.1</b> – Espessuras das amostras com variação maior que 10%. ....	56
<b>Tabela A.1</b> – Dimensões das vigas analisadas.....	69



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS .....	21
2.2 ANÁLISE MODAL.....	22
2.3 VIBRAÇÕES .....	24
2.4 MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....	27
2.5 ÍNDICES DE DANO .....	29
2.5.1 $DI_{ABS}$ e $DI_{ABSF}$ .....	30
2.5.2 $DI_T$ .....	30
2.5.3 $DI_A$ .....	31
2.5.4 $DI_{MS}$ e $DI_{MSCS}$ .....	32
2.5.5 $DI_M$ .....	33
2.5.6 $DI_{GAP}$ .....	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1 DETECÇÃO DE DANO EM VIGA DE FIBRA DE VIDRO/EPÓXI .....	35
3.1.1 Processo de fabricação.....	35
3.1.2 Testes dinâmicos: Experimental.....	37
3.1.3 Testes Dinâmicos: FRF Numérica .....	39
3.2 ANÁLISE MODAL: COMPUTACIONAL .....	40
3.3 DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE DANO .....	42
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1 ANÁLISE MODAL.....	45
4.2 DETECÇÃO DE DANO EM VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO .....	47
4.3 DETECÇÃO DE DANO – AJUSTE NAS AMOSTRAS DE DANO 1 .....	55
4.4 DETECÇÃO DE DANO EM VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO – COMPUTACIONAL.....	60
4.5 EVOLUÇÃO DO ÍNDICE DE DANO EM VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO	

<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O comportamento dinâmico de estruturas pode fornecer informações muito importantes sobre ela, tais como modos de vibrar, frequências naturais e deslocamentos, e por isso é de grande valia estudá-lo, de maneira que se obtenham resultados confiáveis e acessíveis financeiramente. Todas as estruturas estão suscetíveis à degradação e à falha, mas poder prever este acontecimento significa estar à frente de um problema que pode causar prejuízos econômicos e até mesmo à vida humana.

Por esse motivo, o monitoramento de integridade estrutural (do inglês *Structural Health Monitoring* – SHM), tem se mostrado de grande importância na engenharia, no sentido de prever problemas de desempenho e falhas em estruturas e equipamentos, de forma a evitar danos maiores à estrutura e às pessoas envolvidas. De acordo com Lopes *et al.* (2011), o interesse de explorar essa área se deve ao risco em relação à vida humana devido a danos estruturais imprevisíveis, tais como acidentes de avião e colapso de construções.

Em estruturas aeronáuticas são utilizadas técnicas como a tolerância ao dano visando programar períodos de inspeção para regiões críticas do avião. Entretanto, o custo de manutenção pode ser diminuído se estas inspeções forem feitas de maneira otimizada, ou seja, prever quando realmente é necessário realizar a manutenção, evitando tirar de funcionamento uma estrutura que está operando perfeitamente. Neste sentido, o SHM pode ser utilizado a fim de determinar o nível de dano na estrutura e se ela ainda pode continuar operando de forma segura. Ainda, o sistema de SHM não apenas serve para aperfeiçoar o número de inspeções a serem feitas em uma estrutura, mas também assegurar a estabilidade e integridade estrutural e maximizar a vida útil da estrutura (DE MEDEIROS, 2016).

De acordo com De Medeiros (2016), no caso de estruturas feitas de material compósito, o laminado pode ser fabricado não apenas com fibras estruturais, mas também com sensores piezoelétricos, que desempenham um papel fundamental no sistema SHM, haja vista que eles são capazes de não somente detectar a presença do dano, mas também identificar a posição e extensão dele.

Tendo em vista todos os benefícios, tanto econômicos quanto relacionados à segurança, é completamente justificável desenvolver pesquisas visando estudar e aprimorar as técnicas de SHM, de forma que seja cada vez mais acessível e eficiente o processo de identificação de danos em estruturas.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise estrutural em vigas de fibra de vidro/epóxi, aplicando diferentes métricas de detecção de dano. As métricas serão comparadas e verificar-se-á as características de cada uma, verificando a capacidade de identificar a presença de dano na estrutura, para então validar a metodologia de detecção de dano em estruturas de material compósito. Ainda, será realizada a análise modal computacional da estrutura afim de conhecer os modos de vibrar da mesma. Por fim, os dados computacionais serão comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é desenvolvida de tal maneira que seja possível compreender os conceitos do monitoramento de integridade estrutural, bem como tomar conhecimento das métricas que foram utilizadas para a detecção de dano na estrutura.

Assim sendo, o trabalho é constituído por cinco capítulos da seguinte forma:

- **Capítulo 1: Introdução** – descreve de forma geral os conceitos e motivações do tema, bem como os objetivos do presente estudo.
- **Capítulo 2: Fundamentação Teórica** – apresenta os conceitos de material compósito, estudos baseados em vibrações, análise modal e função resposta em frequência (FRF). Também explica o conceito de monitoramento de integridade estrutural, além de apresentar a formulação matemática de todas as métricas de dano estudadas no presente trabalho.
- **Capítulo 3: Materiais e Métodos** – explica a metodologia para a detecção de dano em estruturas, bem como os procedimentos experimentais e computacionais para obtenção dos dados.
- **Capítulo 4: Resultados e Discussões** – apresenta os resultados obtidos com a pesquisa e as discussões acerca deles.
- **Capítulo 5: Conclusões** – descreve as potencialidades e limitações das métricas de detecção de dano e a recomendação para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo Mendonça (2005), material compósito consiste em dois ou mais materiais unidos macroscopicamente, com o intuito de se obter um conjunto de propriedades que os materiais constituintes não podem apresentar individualmente. Reddy (2004) explica que juntos os constituintes do material compósito produzem propriedades desejadas, tais como baixa densidade, alta rigidez e ótima resistência à fadiga e corrosão.

O material compósito é constituído de duas fases, o reforço e a matriz. Um constituinte é o reforço e pode ser em forma de fibras, partículas ou flocos, e é a parte responsável por proporcionar a força e rigidez ao material. O outro constituinte se trata da matriz e tem o papel de conferir proteção. De acordo com Chung (2010), o desempenho mecânico depende das propriedades do reforço e da matriz, e da quantidade e orientação do reforço. Normalmente os materiais compósitos são feitos de finas camadas conhecidas como lâminas, empilhadas de tal maneira (laminado) a garantir os requisitos de projeto.

Os materiais compósitos são diferentes de outros materiais em relação à forma como eles se deformam e falham devido às suas características singulares decorrentes das propriedades da anisotropia e diversificação da microestrutura (VÖLTZ, 2019). Diferentes processos de fabricação podem promover alguns defeitos como porosidade e descolamento da fibra/matriz. O descolamento da fibra acontece devido à baixa adesão entre a fibra e a matriz, causando uma interface fragilizada. Este tipo de defeito também pode ser ocasionado por carregamentos termomecânicos (TALREJA; VARNA, 2015).

A quebra de matriz geralmente é causada por carregamentos de tração, carregamentos de fadiga ou mudanças de temperatura. A quebra da matriz gera uma redução de rigidez nos laminados, não causando falha estrutural, mas ocasionando tipos mais graves de dano tais como delaminação e quebra das fibras. Os materiais compósitos geralmente têm baixas propriedades mecânicas na direção transversal, que resulta em quebras ao longo das fibras (TALREJA; VARNA, 2015).

Outro tipo de defeito é a ruptura das fibras. Os materiais compósitos feitos com reforço de fibra são constituídos de fibras agrupadas e a tensão de ruptura de cada fibra de um agrupamento pode não ser a mesma, principalmente por causa das fibras possuírem tamanhos

diferentes ou devido a imperfeições durante a fabricação da fibra. Na estrutura de material compósito, as fibras romperão em diferentes valores de tensão, gerando fraturas isoladas. Quando mais solicitada, haverá uma concentração de tensão decorrente das fraturas isoladas e isso pode acarretar a falha das fibras adjacentes, levando a um aumento do número de rompimento das fibras e à falha do compósito (TALREJA; VARNA, 2015).

Por fim, a delaminação é um defeito que ocorre por causa da incompatibilidade das propriedades elásticas das camadas interlaminares, havendo assim a separação de duas camadas adjacentes. Bolotin (2001) explica que a delaminação compromete a conexão entre as camadas e é muito frequente em estruturas de material compósito. Este defeito pode ocorrer nas arestas livres ou em superfícies expostas através da espessura. A delaminação acompanha a maioria dos processos de falha de materiais compósitos, mas é mais crítico sob tensão de compressão, tanto através do carregamento de compressão direto quanto através do carregamento de flexão. Segundo Mallick (2007), a existência da delaminação causa uma redistribuição de tensão dentro do laminado, que pode ocasionar o início do rompimento de fibras e reduzir a vida sob fadiga do laminado.

## 2.2 ANÁLISE MODAL

O estudo do comportamento dinâmico de estruturas é um item muito importante na análise de vibrações. Saber como determinado sistema se comporta é fundamental para que se possa estudá-lo mais profundamente. Sendo assim, uma forma de determinar o comportamento dinâmico de uma estrutura é através da análise modal.

De acordo com Rao (2008), a análise modal é capaz de representar a resposta dinâmica de uma estrutura através da determinação das formas modais, das frequências naturais e dos fatores de amortecimento. Esta análise pode ser feita numericamente assim como também pode ser realizada experimentalmente, através de testes de vibração. Salgado (2012) ressalta que o grau de dificuldade desta análise acompanha o nível de complexidade da estrutura, sendo que em estruturas simples com um grau de liberdade a análise também é simples, mas em sistemas mais elaborados com vários graus de liberdade esta análise já se torna bem mais complicada.

De forma resumida, a análise modal tem como ponto central o estudo dos modos de vibração de uma estrutura com o intuito de obter as respostas dinâmicas dela, conhecendo assim o seu comportamento. Almeida (1987) explica que a estrutura pode ser excitada em

qualquer ponto, com exceção dos pontos nodais, a fim de encontrar os parâmetros associados a cada modo, haja vista que os modos de vibração são propriedades globais da estrutura. Estes parâmetros envolvem a frequência natural e o fator de amortecimento, que são únicos para cada modo de vibrar do sistema em análise.

A utilização da análise modal para definir as propriedades dinâmicas da estrutura permite aplicar o estudo de diversas formas, como no desenvolvimento, validação e otimização de modelos analíticos através de experimentos, além de possibilitar o estudo de surgimento de falhas no sistema. A análise de modelos com diferentes características, representando diferentes níveis de dano em suas estruturas possibilita conhecer a variação de comportamento do sistema, e com isso trabalhar na identificação de falhas nele. Conhecer como determinado modelo se comporta ao ter suas características físicas alteradas permite trabalhar em métodos de identificação de falhas, visando a prevenção de problemas estruturais e consequentemente o desenvolvimento de um projeto mais confiável.

A análise modal experimental envolve uma sequência de procedimentos necessários para se obter os parâmetros modais do sistema:

- Obtenção do modelo, que deve ser compatível com o sistema que se quer estudar;
- Coleta dos dados, através da aplicação de uma força conhecida para que se obtenha uma resposta do sistema;
- Tratamento dos dados, ou seja, transformar a resposta física do sistema em um sinal que possa ser lido e interpretado posteriormente;
- Pós-processamento, que nada mais é que a interpretação dos dados.

Rao (2008) explica que os equipamentos essenciais para que a medição seja feita e o procedimento descrito anteriormente possa ser realizado são:

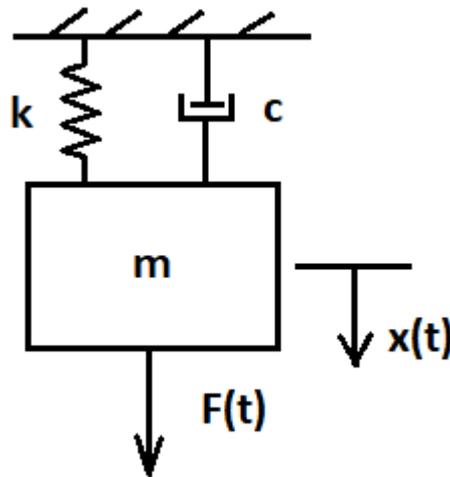
- Uma fonte de vibração, tais como o excitador eletromagnético e o martelo de impacto, que são responsáveis por gerar um impulso na estrutura através de uma força cuja amplitude é conhecida;
- Um transdutor, que possui a função de transformar a resposta física do sistema em um sinal elétrico, sendo os transdutores piezelétricos (acelerômetros) os mais comuns;
- Um condicionador de sinal, que se trata de um equipamento que amplifica e condiciona os dados para que eles possam ser interpretados pelo sistema de aquisição de dados;

- E por fim um analisador, que irá processar os dados com o auxílio de um software. As formas modais, as frequências naturais e os fatores de amortecimento podem ser determinados a partir dos sinais analisados pelo software.

### 2.3 VIBRAÇÕES

Dado um sistema de um grau de liberdade, é possível definir a sua equação de movimento através da análise do diagrama de corpo livre. A figura 2.1 mostra um sistema equivalente de um grau de liberdade.

**Figura 2.1** – Sistema de um grau de liberdade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Definindo as variáveis do sistema, temos que  $m$  é a massa,  $k$  a rigidez,  $c$  o amortecimento. Além disso,  $F(t)$  é a força,  $x(t)$  o deslocamento,  $\dot{x}(t)$  a velocidade e  $\ddot{x}(t)$  a aceleração, todos em função do tempo. Por equilíbrio, o somatório de forças pode ser escrito da seguinte forma,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) . \quad (2.1)$$

Com isso, temos que a equação (2.1) é a equação de equilíbrio dinâmico de um sistema de um grau de liberdade. Entretanto, o que observamos na prática é que os sistemas são mais complexos e, praticamente não encontramos sistemas com apenas um grau de liberdade. De acordo com Balachandran (2011), um sistema com múltiplos graus de liberdade é um sistema

cujo movimento necessita ser descrito por múltiplas coordenadas independentes, sendo os graus de liberdade determinados pelos elementos inerciais presentes e pelas restrições a eles impostas.

O que acontece em sistemas com  $n$ -graus de liberdade é que ao se fazer o diagrama de corpo livre, teremos  $n$  equações de equilíbrio, formando um sistema de equações. Este sistema de equações pode ser reescrito na forma matricial

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{X}} + \mathbf{C}\dot{\vec{X}} + \mathbf{K}\vec{X} = \vec{F}, \quad (2.2)$$

sendo  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{K}$  as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente,  $\vec{F}$  o vetor de forças e  $\ddot{\vec{X}}$ ,  $\dot{\vec{X}}$ ,  $\vec{X}$  os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente.

A equação (2.2) se trata de uma equação diferencial ordinária de 2ª ordem, com coeficientes constantes e sendo as matrizes de massa, amortecimento e rigidez independentes do tempo. Diversos métodos de resolução podem ser aplicados para resolver esta equação diferencial.

Uma forma de trabalhar com esta equação é transformando-a do domínio do tempo para o domínio da frequência. Esta expressão é conhecida como Função de Resposta em Frequência (FRF), e se trata de uma função de transferência no domínio da frequência que relaciona a resposta de um determinado ponto da estrutura com uma excitação de outro ponto dela.

Para fazer esta transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência podemos admitir uma força de excitação

$$\vec{F}(t) = \vec{F}e^{i\omega t}, \quad (2.3)$$

onde  $\vec{F}$  é a amplitude da força,  $\omega$  é a frequência e  $i = \sqrt{-1}$ , que resulta em uma resposta do deslocamento da forma

$$\vec{x}(t) = \vec{U}e^{i\omega t}, \quad (2.4)$$

onde  $\vec{U}$  é a amplitude do deslocamento.

Derivando a equação (2.4), temos

$$\vec{\dot{x}}(t) = i\omega\vec{U}e^{i\omega t}, \quad (2.5)$$

e

$$\vec{\ddot{x}}(t) = -\omega^2\vec{U}e^{i\omega t}. \quad (2.6)$$

Substituindo as equações (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6) na equação (2.2), resulta em

$$-\omega^2\vec{U}e^{i\omega t}\mathbf{M} + i\omega\vec{U}e^{i\omega t}\mathbf{C} + \vec{U}e^{i\omega t}\mathbf{K} = \vec{F}e^{i\omega t}. \quad (2.7)$$

Simplificando, chegamos em

$$[-\omega^2\mathbf{M} + i\omega\mathbf{C} + \mathbf{K}]\vec{U}e^{i\omega t} = \vec{F}e^{i\omega t}. \quad (2.8)$$

Isolando  $\vec{U}$ , temos

$$\vec{U} = [-\omega^2\mathbf{M} + i\omega\mathbf{C} + \mathbf{K}]^{-1}\vec{F}, \quad (2.9)$$

tal que

$$\mathbf{H}(\omega) = [-\omega^2\mathbf{M} + i\omega\mathbf{C} + \mathbf{K}]^{-1}, \quad (2.10)$$

sendo  $\mathbf{H}(\omega)$  a Função de Resposta em Frequência.

Portanto, para um sistema linear a Função de Resposta em Frequência,  $\mathbf{H}(\omega)$  pode ser escrita como

$$\vec{U}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\vec{F}(\omega), \quad (2.11)$$

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{\vec{U}(\omega)}{\vec{F}(\omega)}, \quad (2.12)$$

onde  $\vec{U}(\omega)$  é a resposta de saída do sistema e  $\vec{F}(\omega)$  é a força aplicada para provocar o deslocamento.

A equação (2.12) se trata da razão entre deslocamento e força, ou seja, neste caso a resposta da estrutura está sendo descrita pelo deslocamento, mas ela também pode ser descrita pela velocidade e aceleração,

$$\mathbf{M}(\omega) = \frac{\vec{U}(\omega)}{\vec{F}(\omega)} = i\omega\mathbf{H}(\omega), \quad (2.13)$$

$$\mathbf{A}(\omega) = \frac{\vec{U}(\omega)}{\vec{F}(\omega)} = -\omega^2\mathbf{H}(\omega). \quad (2.14)$$

## 2.4 MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

O monitoramento de integridade estrutural consiste em técnicas de análise de uma estrutura visando detectar danos na mesma. De acordo com Worden e Duijvelde (2004), há quatro áreas principais referentes ao monitoramento de estruturas: *Condition Monitoring* (CM), que engloba técnicas utilizadas principalmente em sistemas rotativos; *Non-Destructive Evaluation* (NDE), sendo o ultrassom e análises de vibração alguns exemplos de técnicas não destrutivas de detecção de dano; *Statistical Process Control* (SPC), que é a utilização de técnicas estatísticas a fim de avaliar o comportamento da estrutura; e *Structural Health Monitoring* (SHM), que são técnicas de avaliação de sinais medidos por sensores a fim de monitorar a estrutura em tempo real.

Ao serem aplicados os sistemas de SHM é possível identificar e localizar danos, prevendo a falha e até mesmo sendo possível estimar a vida útil da estrutura. Os sistemas de SHM têm um vasto campo de aplicações, englobando estruturas da construção civil, aeronáutica, aeroespacial e marítima. Edifícios, pontes, aviões, foguetes, satélites e navios são comumente analisados a fim de evitar danos catastróficos.

Um conceito muito importante envolvendo o monitoramento de integridade de estruturas é o dano estrutural. Dano se trata de uma alteração permanente na estrutura podendo afetar o seu desempenho. Adams (2007) lista uma série de fontes de danos em componentes estruturais, tais como defeitos micro estruturais (inclusões, vazios), trincas (fadiga, dobra), falha de fixação (trinca em solda, quebra de rebite), falha adesiva (separação, delaminação), corrosão, tensão residual e instabilidades, tais como flambagem. Tais fontes de danos alteram o comportamento do material e podem comprometer o desempenho do

componente, aumentando significativamente a possibilidade de falha e causando prejuízos tanto de natureza econômica quanto até mesmo risco à vida de pessoas.

Desta forma, monitorar e identificar danos estruturais significa obter um alto grau de segurança, além contribuir economicamente, haja vista que é possível ter um maior controle sobre as manutenções a serem feitas na estrutura. O monitoramento da integridade estrutural contribui no sentido de otimizar a quantidade de inspeções periódicas, além de maximizar a eficiência das manutenções programadas. Sendo assim, ganha-se muito do ponto de vista econômico ao se fazer inspeções quando necessário e evitar manutenções imprevistas, que devem ser realizadas devido às falhas e é extremamente indesejável. A respeito das inspeções nos componentes estruturais, é necessário fazê-las periodicamente a fim de manter a confiabilidade e segurança, sendo esta a razão de haver tantas técnicas não destrutivas para a detecção de dano em estruturas (FAN e QIAO, 2011).

Para que as condições de segurança e manutenção ideais sejam satisfeitas, as técnicas para detectar e localizar o dano devem ser precisas. As avaliações não destrutivas são adequadas para fazer esta detecção, mas muitas destas técnicas exigem a localização do dano e que esta localização seja acessível. Entretanto, a detecção de dano por meio da análise de sinais de vibração não exige esse tipo informação, mas utiliza como fonte de estudo as mudanças no comportamento dinâmico da estrutura decorrente do dano associado a ela. O dano em um sistema pode alterar a sua integridade estrutural, e com isso, as propriedades físicas tais como massa, rigidez e amortecimento podem sofrer mudanças. Estas propriedades influenciam diretamente a resposta dinâmica do sistema. Sendo assim, o dano possui uma relação direta com o comportamento dinâmico, haja vista que ao alterar as propriedades físicas, ele causa também alterações dinâmicas na estrutura.

O comportamento dinâmico pode ser descrito no domínio do tempo, da frequência ou modal. No caso de técnicas baseadas na Função de Resposta em Frequência (FRF), elas consistem na coleta dos dados para o monitoramento da estrutura por meio da excitação natural ou forçada desta (BAPTISTA, 2010). A excitação natural nada mais é que a vibração que ocorre em condições normais de operação do sistema, enquanto a excitação forçada é realizada de maneira controlada por equipamentos específicos para estes procedimentos, tais como o *shaker*, que tem a função de excitar a estrutura, e transdutores piezelétricos, que são sensores capazes de captar os sinais vibratórios da mesma (BAPTISTA, 2010). A FRF relaciona a resposta dinâmica estrutural a uma força aplicada e a sua resposta pode ser escrita na forma de deslocamento, velocidade ou aceleração. De Medeiros (2016) afirma que a FRF

pode ser expressa em função de propriedades estruturais tal como massa, rigidez, amortecimento e propriedades modais.

As técnicas de monitoramento de estruturas baseadas em vibrações têm contribuído de forma relevante para o desenvolvimento dos sistemas SHM. Estas técnicas têm como princípio a observação de alterações nas respostas vibratórias da estrutura, que são decorrentes da presença do dano na mesma. Em muitos métodos, o monitoramento é realizado a partir da avaliação de um modelo intacto da estrutura em questão, e então este modelo é comparado com os dados medidos da estrutura no estado atual em que ela se encontra (DE MEDEIROS, 2016). Obtém-se assim informações em situações distintas da estrutura, sendo o primeiro modelo intacto, ou seja, sem dano, e o segundo modelo o danificado, tal que as diferenças apresentadas entre estes dois modelos indicam as alterações que ocorreram na estrutura, que podem ter sido ocasionadas pelo dano. A fim de facilitar a identificação destas alterações na estrutura, muitas métricas de detecção de dano em estruturas têm sido estudadas e implementadas.

Geralmente a Função de Resposta em Frequência (FRF) é utilizada por estas métricas de monitoramento. Os dados decorrentes da FRF fornecem muito mais informações de dano em uma faixa de frequências desejadas do que os dados modais, já que os dados modais são extraídos em faixas de frequência próximas à ressonância, além de que as alterações nas formas modais são mais difíceis de medir do que os dados da FRF. Sendo assim, os dados fornecidos pela FRF são mais úteis para a detecção e monitoramento de danos em estruturas (DE MEDEIROS, 2016).

## 2.5 ÍNDICES DE DANO

As métricas para monitoramento de dano em estruturas podem ser calculadas utilizando diferentes parâmetros modais, como as frequências de ressonância, modos de vibração, fases e amplitudes. A escolha dos parâmetros a serem utilizados varia de acordo com o tipo de análise que é feita, o tipo de sensores a serem utilizados para coletar os dados, dados experimentais previamente conhecidos da estrutura, além do tipo e localização do dano a ser estudado. Diversos autores apresentaram formulações para comparar a estrutura na condição intacta com a condição danificada e, a partir disso, obter um índice de dano para quantificar o dano causado na estrutura. A seguir serão apresentadas diferentes métricas que utilizam a amplitude e frequência das FRFs como objeto de estudo.

### 2.5.1 $DI_{ABS}$ e $DI_{ABSF}$

Monaco *et al.* (2000) utilizou as alterações nas FRFs com o objetivo de determinar os índices de dano ( $DI$ ). Como explanado anteriormente, os danos que ocorrem na estrutura afetam a resposta dinâmica dela. Sendo assim, haverá alteração na FRF da estrutura antes de sofrer o dano em comparação com a FRF da estrutura danificada, sendo possível, desta forma, calcular um índice de dano que represente o quanto a estrutura foi afetada. Basicamente, este método consiste na obtenção dos dados e comparação da FRFs da estrutura intacta com a danificada. São apresentadas duas expressões para esta abordagem, na qual os índices calculados são as médias das diferenças entre as estruturas antes e depois de ter sofrido o dano,

$$DI_{ABS_{jk}} = \frac{\sum_{n=1}^N |H_{jk}^i(\omega) - H_{jk}^d(\omega)|}{\sum_{n=1}^N |H_{jk}^i(\omega)|}, \quad (2.15)$$

$$DI_{ABSF_{jk}} = \sum_{n=1}^N \frac{\left( \frac{|H_{jk}^i(\omega) - H_{jk}^d(\omega)|}{|H_{jk}^i(\omega)|} \right)}{N}, \quad (2.16)$$

onde  $H_{jk}(\omega)$  é a receptância ou um valor Função de Resposta em Frequência medida na  $j$ -ésima posição com uma excitação aplicada na  $k$ -ésima coordenada para uma dada frequência  $\omega$ . O índice  $i$  se refere ao valor da estrutura intacta, o índice  $d$  ao valor da estrutura danificada e  $N$  se trata do número de frequências analisadas. Quanto a interpretação do resultado, se houver qualquer alteração na estrutura a sua resposta dinâmica será afetada e com isso a resposta intacta será diferente da resposta danificada, e essa diferença acarretará num valor de  $DI$  maior que zero. Já se o índice de dano for igual a zero significa que a estrutura não sofreu dano.

### 2.5.2 $DI_T$

Johnson e Adams (2002) estudaram a utilização de funções de transmissibilidade no domínio da frequência com o objetivo de detectar, localizar e quantificar o dano em estruturas lineares

e não lineares. Este método é baseado na razão de transmissibilidade  $H_{jk}^i(\omega)/H_{jk}^d(\omega)$ , onde  $H_{jk}^i(\omega)$  é a função de transmissibilidade de referência, ou seja, referente à estrutura na condição intacta e  $H_{jk}^d(\omega)$  é a função medida em um outro momento para ser comparada com a primeira. O índice de dano foi calculado conforme a expressão,

$$DI_{T_{jk}} = \frac{1}{N} \left| \sum_{\omega} 1 - \frac{|H_{jk}^i(\omega)|}{|H_{jk}^d(\omega)|} \right|, \quad (2.17)$$

onde  $H$  é a transmissibilidade e, da mesma forma que a formulação de Monaco *et al.* (2000), o índice  $i$  se refere à estrutura intacta e o índice  $d$  à estrutura danificada. Caso haja alguma alteração na resposta dinâmica da estrutura a expressão retornará um valor de  $DI_T$  maior que zero, mas se não houver nenhuma variação no comportamento dinâmico o valor de  $DI_T$  será igual a zero.

### 2.5.3 $DI_A$

Mickens *et al.* (2003) desenvolveu um método explorando a sensibilidade das FRFs a pequenas alterações na estrutura. O índice de dano é calculado para determinar a diferença das respostas das FRFs entre a estrutura sem dano e a com dano, de modo a quantificar esta sensibilidade. O indicador de dano é calculado através da diferença percentual entre as magnitudes das FRFs das estruturas intacta e danificada. Determina-se o índice de dano  $DI$  através do valor médio de  $y(\omega)$  para a faixa de frequências desejada através de

$$y(\omega) = abs \left( \frac{|H_{jk}^i(\omega) - H_{jk}^d(\omega)|}{|H_{jk}^i(\omega)|} \right), \quad (2.18)$$

$$DI_A = \frac{\Delta\omega}{\omega_2 - \omega_1} \sum_{\omega_1}^{\omega_2} y(\omega), \quad (2.19)$$

sendo  $\omega_1$  a menor frequência e  $\omega_2$  a maior frequência da faixa de frequências estudada. Além disso,  $\Delta\omega$  é o incremento da frequência entre os pontos medidos. Como nas outras métricas, os sobrescritos  $i$  e  $d$  representam as estruturas intacta e danificada, respectivamente.

O índice de dano determinado por esta métrica fornece uma medida normalizada de dano na estrutura. Uma vez que estes valores são coletados, eles podem quantificar o dano presente na estrutura. Para qualquer variação na resposta dinâmica da estrutura o índice de dano será maior que zero, e ele será igual a zero se não houver nenhum dano na estrutura.

#### 2.5.4 D<sub>IMS</sub> e D<sub>IMSCS</sub>

Maia *et al.* (2003) utilizou as diferenças entre as curvas de duas FRFs medidas em posições específicas. Este método é utilizado para determinar a influência do dano em análises com condições de contorno livre-livre. A métrica pode ser escrita como:

$$\Delta H_{jk}(\omega) = |H_{jk}^d(\omega) - H_{jk}^i(\omega)|, \quad (2.20)$$

onde  $H(\omega)$  é a função de resposta em frequência e  $\omega$  é a faixa de frequências estudada. Os sobrescritos  $i$  e  $d$  se referem, respectivamente, às estruturas intacta e danificada, já os subscritos  $j$  e  $k$  simbolizam as localizações do ponto medido e do ponto de aplicação da força, respectivamente.

No caso de mais de uma força e uma frequência serem consideradas, o índice de dano deve englobar o somatório dos índices para cada frequência e força. Sendo assim, o método pode ser definido como,

$$DI_{MSj} = \frac{1}{N} \sum_{\omega} \sum_k \Delta H_{jk}(\omega). \quad (2.21)$$

No caso do presente trabalho, apenas uma força é considerada para uma faixa de frequências, então a equação pode ser descrita como,

$$DI_{MSjk} = \frac{1}{N} \sum_{\omega} \Delta H_{jk}(\omega). \quad (2.22)$$

Maia *et al.* (2003) ainda apresenta outro método, que consiste em calcular a diferença dos quadrados das funções de resposta em frequência, conforme a equação:

$$(\Delta H_{jk}(\omega))^2 = \left| \left( H_{jk}^d(\omega) \right)^2 - \left( H_{jk}^i(\omega) \right)^2 \right|, \quad (2.23)$$

Da mesma forma que o método anterior, mais de uma força e uma frequência podem ser consideradas, mas no presente trabalho apenas uma força foi utilizada para realizar o estudo. Sendo assim, o método pode ser definido como,

$$DI_{MSCS_{jk}} = \frac{1}{N} \sum_{\omega} (\Delta H_{jk}(\omega))^2. \quad (2.24)$$

Nestas duas métricas apresentadas por Maia *et al.* (2003), o índice de dano será maior que zero caso haja alguma alteração no comportamento dinâmico da estrutura e será igual a zero caso não exista nenhuma variação na resposta dinâmica dela.

### 2.5.5 $DI_M$

Silva *et al.* (2008) apresentou um índice de dano baseado no desvio da raiz quadrada média (RMSD, do inglês *root-mean-square deviation*), sendo este calculado com os dados no domínio da frequência. Apesar deste índice de dano ter sido desenvolvido para o sinal de impedância elétrica, ele pode ser adaptado para se utilizar em análises de vibração, que é o caso do presente trabalho. Sendo assim, a equação que descreve este índice é,

$$DI_{M_j} = \frac{1}{N} \sum_{\omega} \sqrt{\frac{\left( H_{jk}^i(\omega) - H_{jk}^d(\omega) \right)^2}{\left( H_{jk}^i(\omega) \right)^2}}. \quad (2.25)$$

Os valores utilizados no cálculo desta métrica podem ser medidos por uma variedade de sensores, como acelerômetros e transdutores piezoelétricos, a fim de quantificar o dano ocorrido na estrutura.

Assim como nas outras métricas já descritas, o valor do índice será maior que zero caso haja alguma variação no comportamento dinâmico da estrutura e será igual a zero caso não haja nenhum dano na estrutura.

### 2.5.6 $DI_{GAP}$

De Medeiros *et al.* (2015a; 2015b) desenvolveu uma métrica de dano utilizada para identificar a influência do dano na resposta de estruturas com condição de contorno livre-livre. O índice de dano apresentado é calculado com base na faixa de frequências desejada, e pode ser definido como,

$$DI_{GAP_j} = \left| 1 - \frac{\sum_{\omega} (H_{jk}^d(\omega) \cdot P_{jk}^d(\omega))}{\sum_{\omega} (H_{jk}^i(\omega) \cdot P_{jk}^i(\omega))} \right|, \quad (2.26)$$

sendo  $H(\omega)$  a amplitude,  $P(\omega)$  a fase e  $\omega$  a faixa de frequências estudada. Os sobrescritos  $i$  e  $d$  se referem, respectivamente, às estruturas intacta e danificada, e os subscritos  $j$  e  $k$  simbolizam as localizações do ponto medido e do ponto de aplicação da força, respectivamente.

Os valores de fase são multiplicadores que amplificam os valores das amplitudes, mas no caso deste trabalho as fases não foram consideradas. Sendo assim, a equação pode ser simplificada para:

$$DI_{GAP_j} = \left| 1 - \frac{\sum_{\omega} H_{jk}^d(\omega)}{\sum_{\omega} H_{jk}^i(\omega)} \right|. \quad (2.27)$$

Quando há alguma alteração no comportamento dinâmico da estrutura, o índice de dano retornará um valor maior que zero, mas retornará um valor igual a zero se não houver nenhuma alteração na resposta dinâmica da estrutura, significando que não há dano na estrutura.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do trabalho, sendo detalhadas as etapas de produção dos corpos de prova de material compósito, assim como a execução dos testes para a coleta dos dados. É também descrito o processo de análise dos dados e o procedimento utilizado para a aplicação dos métodos de índice de dano, incluindo a análise e comparação dos índices estudados.

#### 3.1 DETECÇÃO DE DANO EM VIGA DE FIBRA DE VIDRO/EPÓXI

Para que a análise de dano estrutural pudesse ser realizada um conjunto de vigas de fibra de vidro e epóxi foram produzidas, possuindo diferenças em suas estruturas para se obter vigas intactas e danificadas. As vigas foram feitas utilizando-se a técnica modificada de Moldagem por Transferência de Resina Assistido a Vácuo (*VARTM*), e para se obter vários níveis de dano na estrutura foram realizados diferentes tamanhos de delaminação durante o processo de laminação. Foram então realizados testes baseados em vibração para se obter os dados da Função de Resposta em Frequência (FRF) e para, por fim, serem aplicados os métodos de identificação de dano através de rotinas implementadas em um software de computação numérica.

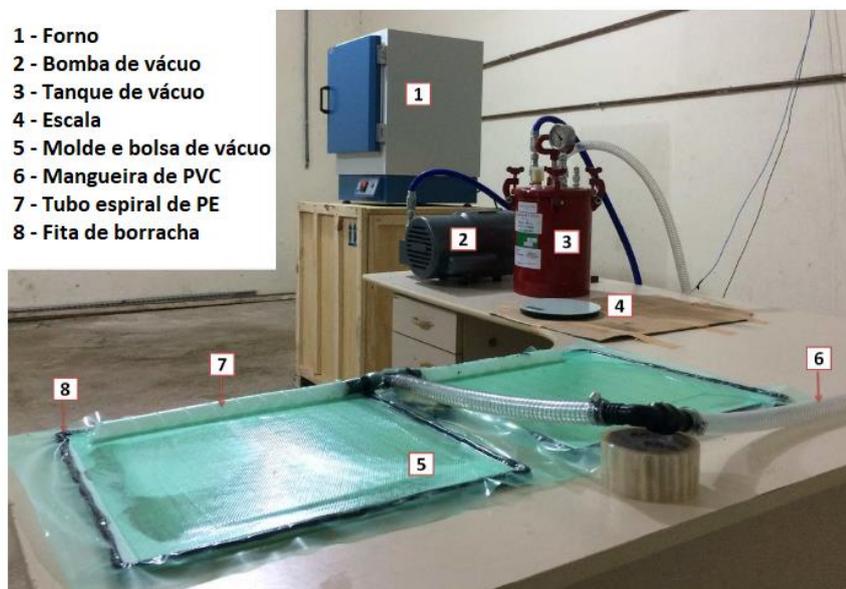
##### 3.1.1 Processo de fabricação

Völtz (2019) descreve que para a fabricação das vigas foram utilizadas a resina epóxi AR-260 e o endurecedor epóxi AH-150, os quais foram combinados em uma proporção de 3:1. O tempo de reação entre a resina e o endurecedor é de 50 minutos a 25°C. A manta de fibra de vidro utilizada foi a WRU 221 RT fabricada pela Texiglass.

Os equipamentos utilizados para a execução do *VARTM* modificado são representados na Figura 3.1. Völtz (2019) explica que a resina epóxi foi colocada diretamente no molde, sem utilizar uma bomba injetora de resina. Além disso, antes de iniciar o processo de fabricação

das placas, as fibras e a resina foram armazenadas no forno aquecido a 70°C com o objetivo de diminuir a absorção de umidade pela resina.

**Figura 3.1** – Layout do processo de fabricação VARTM



Fonte: Völtz (2019)

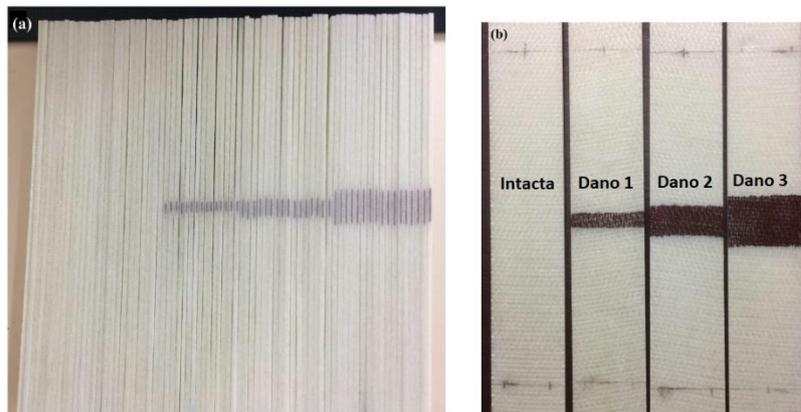
A simulação do dano de delaminação foi feita utilizando uma fita de Teflon, que foi inserida entre as camadas 6 e 7 da placa. Foram fabricadas placas com quatro condições de dano diferentes, como mostrado na Figura 3.2, sendo três placas sem dano, duas placas com delaminação de 5 mm, caracterizando o Dano 1, duas placas com delaminação de 10 mm (Dano 2) e mais duas placas com delaminação de 19 mm, sendo estas as placas de Dano 3. As placas foram então cortadas em tiras com um disco diamantado, obtendo assim as vigas de material compósito. No fim do processo, obteve-se 25 vigas intactas, 15 vigas de Dano 1, 16 vigas de Dano 2 e 17 vigas de Dano 3. A Tabela 3.1 mostra as dimensões médias e os desvios padrão de todas as vigas.

**Tabela 3.1** – Dimensões médias e desvios médios das vigas de fibra de vidro/epóxi.

	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)
<b>Média</b>	28,35	227	3,00
<b>Desvio Médio</b>	0,146	0,097	0,136

Fonte: Völtz (2019)

**Figura 3.2** – Vigas de compósito: Quatro condições de dano.



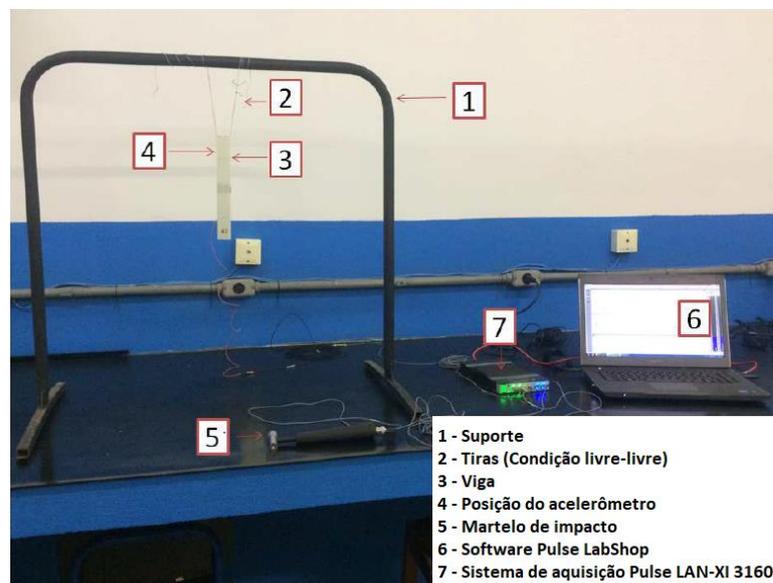
Fonte: Völtz (2019)

### 3.1.2 Testes dinâmicos: Experimental

Para a realização dos testes dinâmicos nas vigas, cujo aparato é mostrado na Figura 3.3, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Martelo de impacto Brüel & Kjaer modelo 8206-003 (sensibilidade de 1,14 mV/N) com ponteira de alumínio;
- Acelerômetro Brüel & Kjaer modelo 4517-C (sensibilidade de 0,18 pC/m<sup>2</sup> e peso de 0,6g);
- Conversor de sinal Brüel & Kjaer modelo 2647-B (sensibilidade de 10 mV/pC);
- Software PULSE LabShop da Brüel & Kjaer.

**Figura 3.3** – Configuração do sistema experimental.

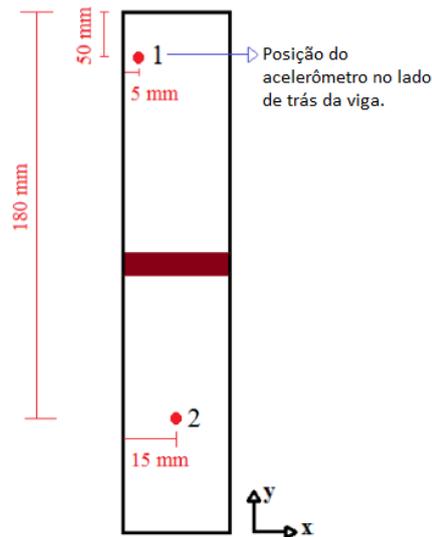


- 1 - Suporte
- 2 - Tiras (Condição livre-livre)
- 3 - Viga
- 4 - Posição do acelerômetro
- 5 - Martelo de impacto
- 6 - Software Pulse LabShop
- 7 - Sistema de aquisição Pulse LAN-XI 3160

Fonte: Völtz (2019)

Todas as vigas foram ensaiadas na condição de contorno livre-livre e a faixa de frequências analisada foi 0 – 3200 Hz, totalizando 6400 pontos espectrais. O acelerômetro foi fixado na parte de trás da viga, na posição 1 e as forças foram aplicadas nas posições 1 e 2. A Figura 3.4 ilustra os pontos onde a viga foi impactada e onde o acelerômetro foi posicionado.

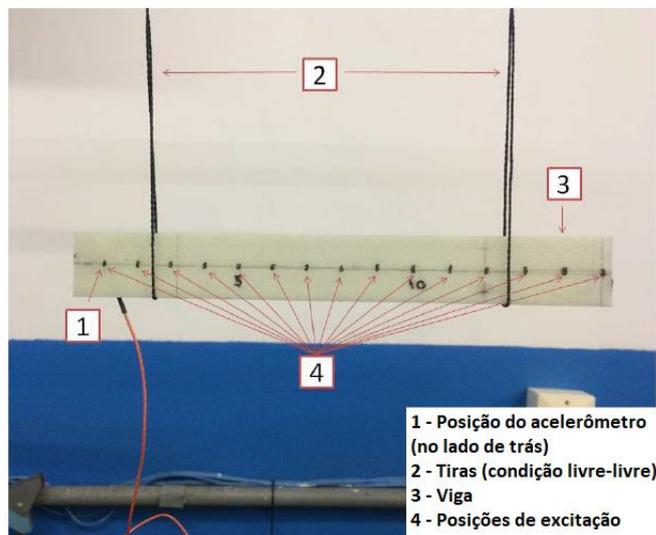
**Figura 3.4** – Posição do acelerômetro e posição de excitação na viga.



Fonte: Völtz (2019)

Utilizando o mesmo aparato experimental descrito anteriormente e representado na Figura 3.5, uma análise modal considerando 15 pontos foi realizada em uma viga intacta com o intuito de analisar quais modos correspondem aos modos de flexão e de torção.

**Figura 3.5** – Configuração da análise modal.

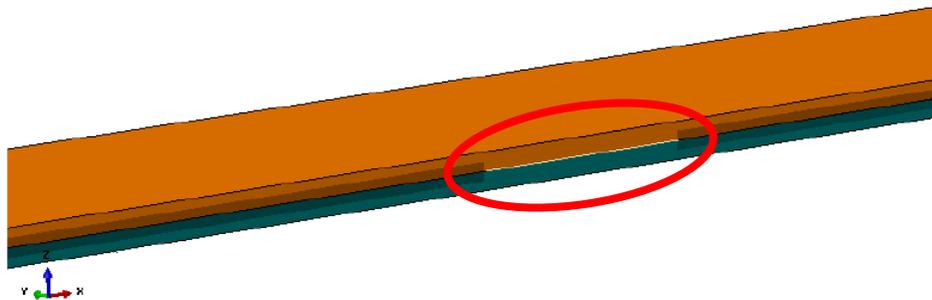


Fonte: Völtz (2019)

### 3.1.3 Testes Dinâmicos: FRF Numérica

Völtz (2019) realizou uma avaliação numérica utilizando o método de elementos finitos em uma viga de material compósito com a condição livre-livre. O modelo foi feito no software ABAQUS 6.12, com 25938 elementos quadrilaterais de casca contínua (SC8R), com 8 nós com três graus de liberdade. Os elementos de casca são utilizados nos casos em que a espessura é significativamente menor que as outras dimensões do modelo estrutural. O modelo desenvolvido por Völtz (2019) é representado na Figura (3.6), e consiste em duas vigas, sendo que a linha entre elas representa a delaminação.

**Figura 3.6** – Modelo de viga dupla com delaminação.



Fonte: Völtz (2019)

Völtz (2019) explica que o número de elementos foi determinado através do erro entre as frequências de uma malha mais refinada e outras duas malhas (0,001 e 0,002). O máximo erro entre as frequências da malha de 0,001 e da malha mais refinada foi de 0,047%, no terceiro modo. Sendo assim, o tamanho de malha de 0,001 foi escolhido.

A Tabela 3.2 apresenta as propriedades geométricas e mecânicas do modelo. Tal como no procedimento experimental, dois acelerômetros e uma força de excitação foram adicionados (nas mesmas posições do experimental), e os sinais de vibração foram simulados com uma frequência de amostragem de 1,0Hz. A faixa de frequência estudada foi de 1500Hz, com as condições simuladas semelhantes às do procedimento experimental.

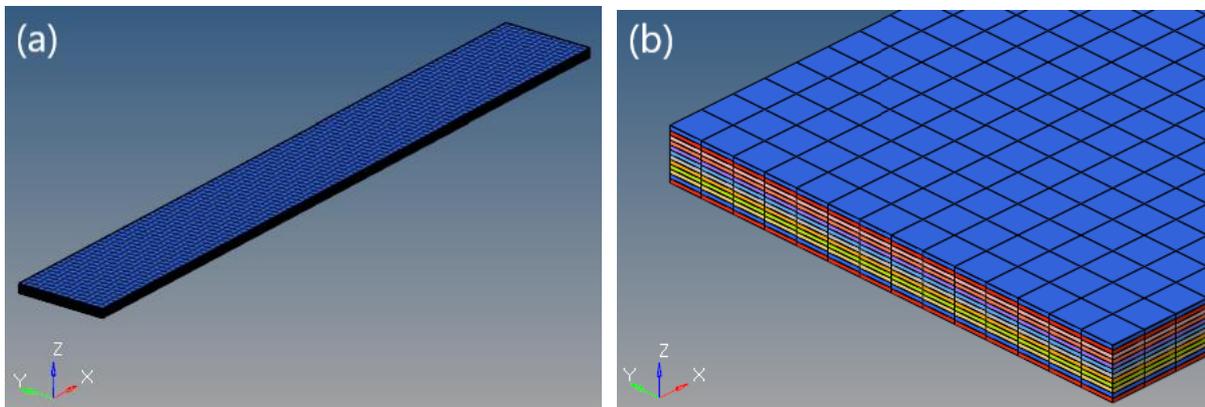
**Tabela 3.2** – Propriedades geométricas e mecânicas: simulação numérica.

Propriedade	Valor
Comprimento	227 mm
Largura	28,35 mm
Espessura	3,00 mm
Mód. de elasticidade longitudinal	30,0 GPa
Mód. de elasticidade transversal	15,0 GPa
Densidade do compósito	1260 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de cisalhamento - G <sub>11</sub>	5,9 GPa
Módulo de cisalhamento - G <sub>12</sub>	5,9 GPa
Módulo de cisalhamento - G <sub>13</sub>	4,0 GPa
Coefficiente de Poisson	0,18
Orientação de empilhamento	[0] <sub>12</sub>

Fonte: Völtz (2019)

### 3.2 ANÁLISE MODAL: COMPUTACIONAL

A fim de analisar os modos de vibrar da viga estudada, criou-se um modelo no software Hyperworks. O modelo foi feito simulando uma viga intacta, ou seja, sem a presença de delaminação, com dimensões de 220 mm de comprimento e 28 mm de largura. Para compor a viga, foram criadas doze lâminas com 0,25 mm de espessura, resultando em uma espessura total de 3 mm. A Figura 3.7 mostra o modelo criado para realizar a análise modal e as camadas que compõem a viga.

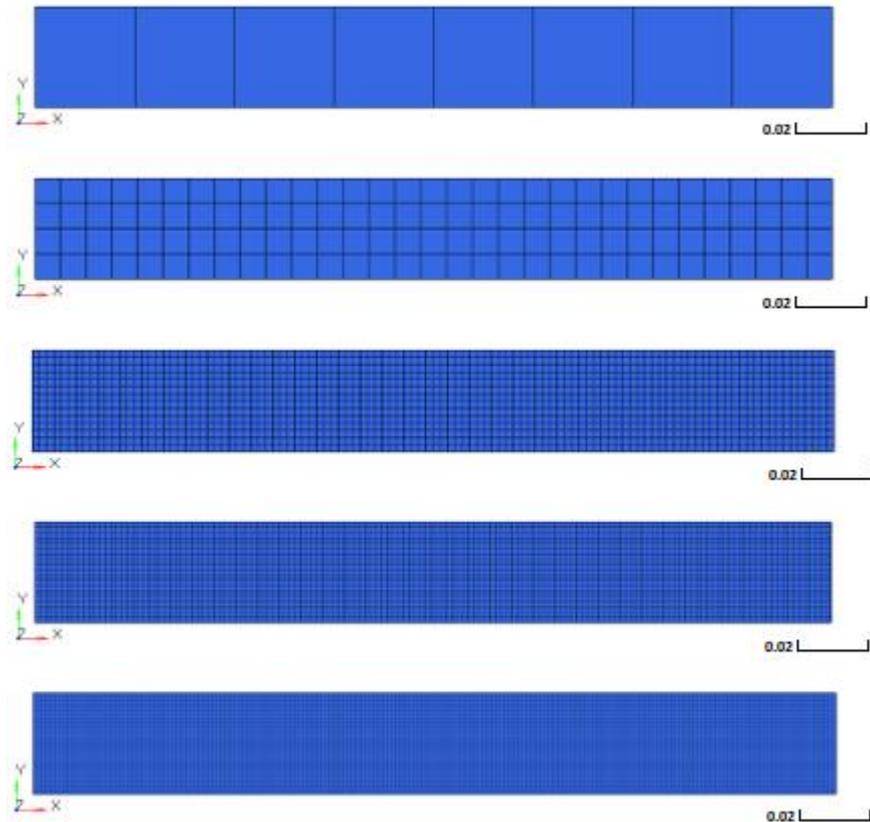
**Figura 3.7** – Modelo criado no Hypermesh

Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha aplicada possui 1540 elementos, com o tamanho de elemento de 2 mm. Este refinamento de malha auxiliou no processo de validação dos pontos escolhidos para colocar o acelerômetro, haja vista que nenhum dos dois pontos onde o acelerômetro foi posicionado se tratava de um ponto com deslocamento nulo.

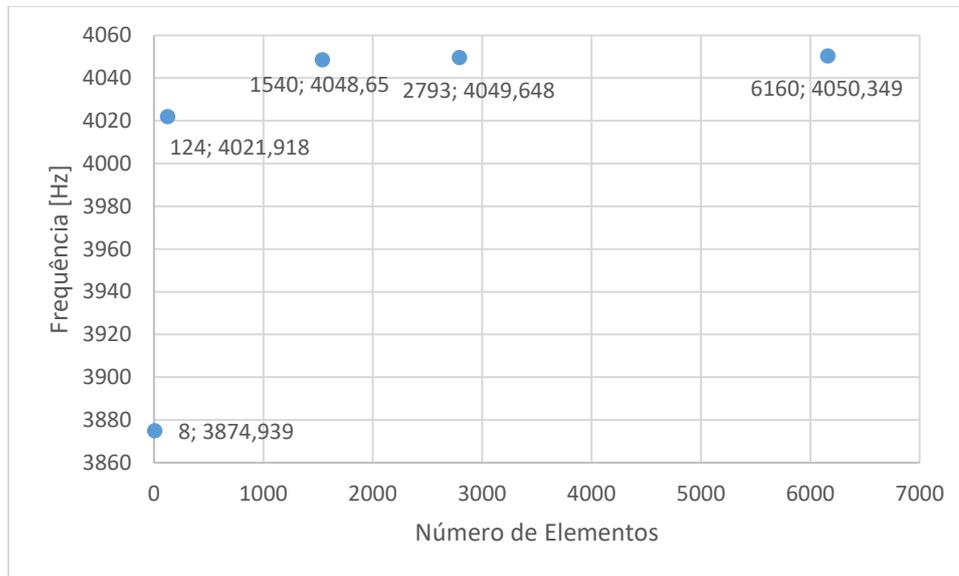
A escolha da malha com 1540 elementos foi feita com base no processo de refinamento de malha, onde foram criadas várias malhas com diferentes números de elementos e foram verificadas as frequências de cada uma, referente ao sexto modo de vibrar da estrutura. O sexto modo de vibrar foi escolhido com o objetivo de garantir que os modos anteriores a ele fossem bem explicados pela discretização feita a partir deste modo. A Figura 3.8 ilustra as malhas que foram utilizadas para o processo de convergência.

**Figura 3.8** – Malhas com diferentes níveis de refinamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.9 mostra o processo de convergência de malha, explicitando o número de elementos e a respectiva frequência.

**Figura 3.9** – Convergência da Malha

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 3.9, a partir de 1540 elementos a frequência praticamente não apresenta mudança, e comparando a malha de 1540 elementos com a de 6160 elementos o erro relativo é de 0,042%. Sendo assim, a escolha da malha de 1540 elementos garante resultados satisfatórios.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE DANO

A partir da metodologia anteriormente descrita as amplitudes para a faixa de frequências estudada foram coletadas. Estas informações foram então utilizadas para calcular o índice de dano na estrutura a partir de diferentes métodos já descritos neste trabalho.

A realização dos cálculos se deu por meio da implementação de rotinas no software de computação numérica Scilab 6.0.1. A sequência de operações feita nas rotinas é descrita a seguir:

- 1 – Leitura dos dados obtidos nos testes experimentais;
- 2 – Aplicação do método de índice de dano para cada frequência;
- 3 – Cálculo de médias e desvios padrão;
- 4 – Gravação dos resultados em arquivo para posterior análise.

Ao todo foram estudados oito métodos de detecção de dano em estruturas, e para cada método foi realizada a comparação das FRFs das amostras intactas com as amostras referentes ao dano 1, dano 2 e dano 3, além de serem comparadas com elas mesmas, a fim de se verificar a variação que poderia haver entre as amostras que não estavam sujeitas à delaminação.

Para os cálculos foram utilizados os dados de 25 vigas intactas, 15 vigas com dano 1, 15 vigas com dano 2 e 15 vigas com dano 3. Cada viga intacta foi comparada com todas as vigas danificadas, obtendo-se assim uma matriz de 15 linhas por 25 colunas para cada dano. A partir destas matrizes calculou-se as médias e desvios padrão de acordo com as condições descritas a seguir:

- 1 – Média do índice de todas as amostras danificadas para cada amostra intacta;
- 2 – Média do índice de todas as amostras intactas para cada amostra danificada;
- 3 – Média do índice de todas as amostras.

Além disso, calculou-se a média das FRFs para cada condição ponto a ponto, obtendo-se assim uma FRF média para as intactas e uma FRF média para cada nível de dano.

Os cálculos descritos anteriormente foram realizados para os dois pontos onde a força foi aplicada ( $H_{11}$  e  $H_{21}$ ). Sendo assim, ao final dos cálculos obteve-se quatro variações de índice de dano do mesmo método de detecção de dano para cada ponto de excitação.

Conforme será visto na seção dos resultados, a fim de se obter um resultado condizente com a teoria, algumas amostras de dano 1 com variação dimensional acima do aceitável foram removidas da análise, e então todo o procedimento foi refeito para as vigas sujeitas ao dano de nível 1. Sendo assim, foram utilizados os dados de oito vigas de dano 1 para a nova análise.

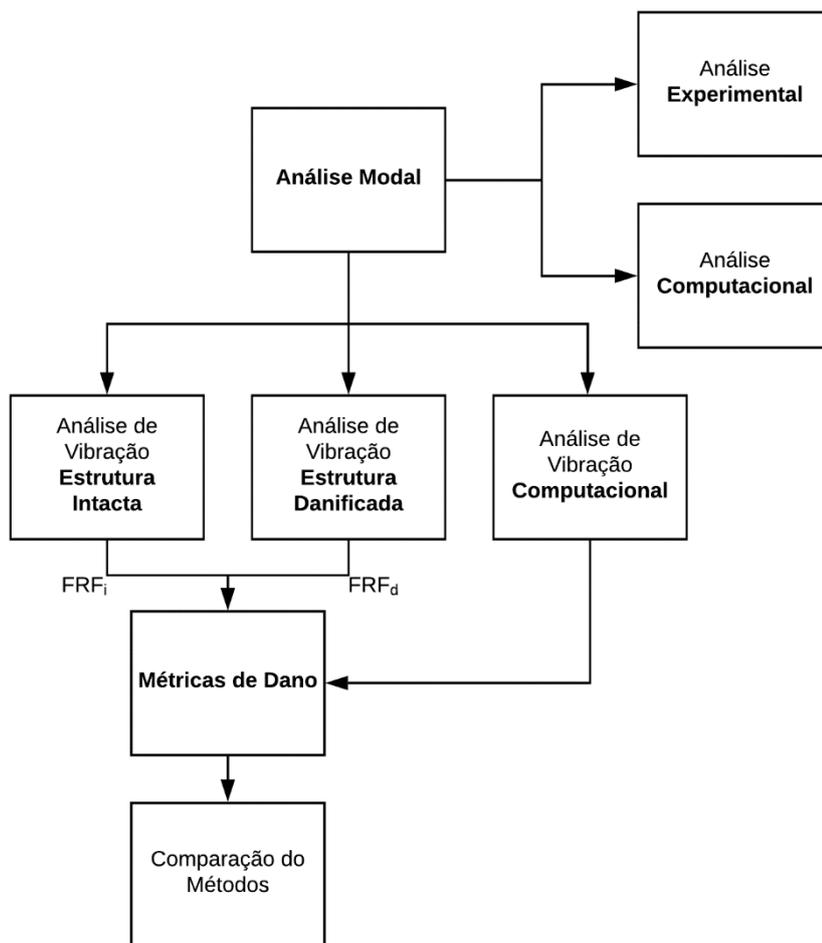
Além dos dados experimentais, também foram estudadas as respostas dinâmicas simuladas computacionalmente no software ABAQUS. Foram obtidas as Funções de Resposta em Frequência para os três casos de dano e comparadas com a da condição intacta, da mesma forma como foi feita com os dados experimentais. A faixa de frequências estudada para o modelo computacional foi de 0 a 1500 Hz.

Os índices de dano do modelo computacional foram comparados com os índices das FRFs médias para cada condição de dano. Além disso foi realizada uma análise de evolução do dano, com o objetivo de examinar como o dano evoluiu conforme a frequência aumenta.

A Figura 3.10 apresenta um fluxograma da metodologia aplicada. As análises modais experimental e computacional são realizadas na estrutura intacta com o intuito de obter as frequências naturais e as formas modais. A análise de vibração é realizada na estrutura intacta com o objetivo de determinar o comportamento da estrutura não danificada.

Semelhantemente, a análise na estrutura danificada consiste em determinar o comportamento danificado. A análise de vibração computacional é realizada utilizando modelos computacionais intacto e danificado. Então, os comportamentos intacto e danificado são comparados através de diferentes métricas de dano.

**Figura 3.10** – Fluxograma representando a metodologia científica utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 RESULTADOS

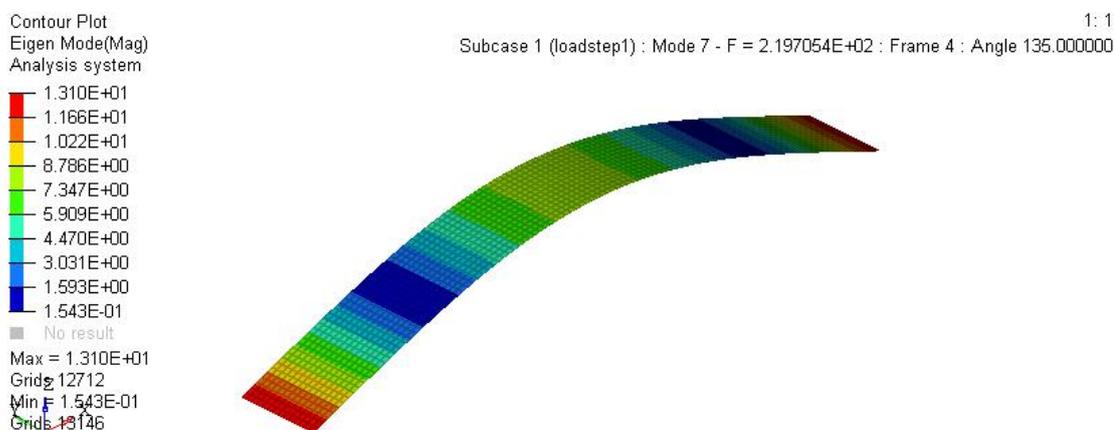
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através dos dados das FRFs de cada viga analisada, na qual foram aplicados diferentes índices de dano a fim de se verificar se os métodos de detecção de dano são capazes de prever uma falha através de técnicas baseadas em vibração. Inicialmente, são apresentados os modos de vibrar da estrutura obtidos através da análise modal. Então são mostrados os índices de dano dos dados experimentais, calculados de acordo com as métricas escolhidas, e as comparações entre eles. Os resultados obtidos após a correção amostral para as vigas de dano 1 são apresentados logo após, e explicitam a diferença obtida entre os dois conjuntos de amostras.

Por fim, os resultados gerados através dos dados computacionais são apresentados, e é feita a comparação com os índices de dano experimentais, além de ser apresentada a curva de evolução do dano tanto para os dados computacionais quanto para os experimentais.

### 4.1 ANÁLISE MODAL

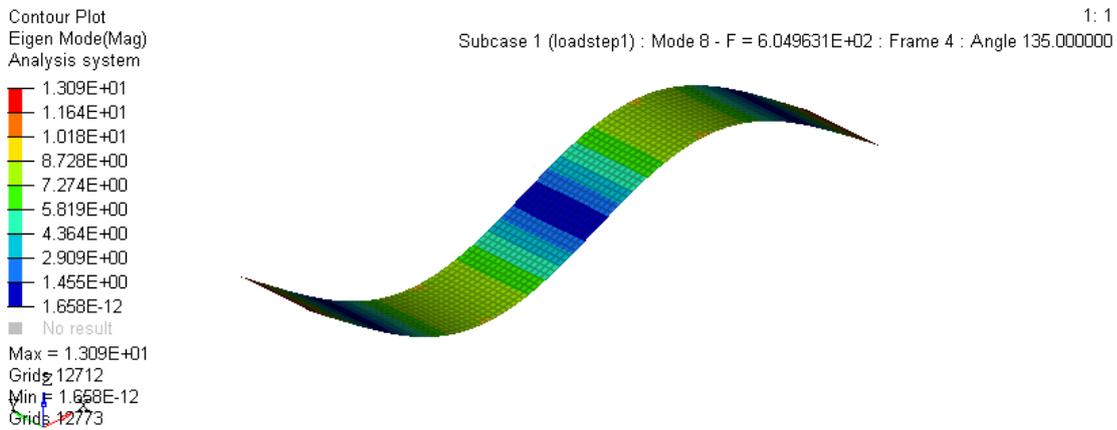
A fim de entender os modos de vibrar da viga estudada e validar os pontos que foram utilizados para aplicação da força e medição da resposta dinâmica, a análise modal da estrutura foi realizada. As Figuras 4.1 – 4.6 mostram os modos de vibrar da viga até o sexto modo.

**Figura 4.1** – Primeiro modo de vibrar da estrutura.



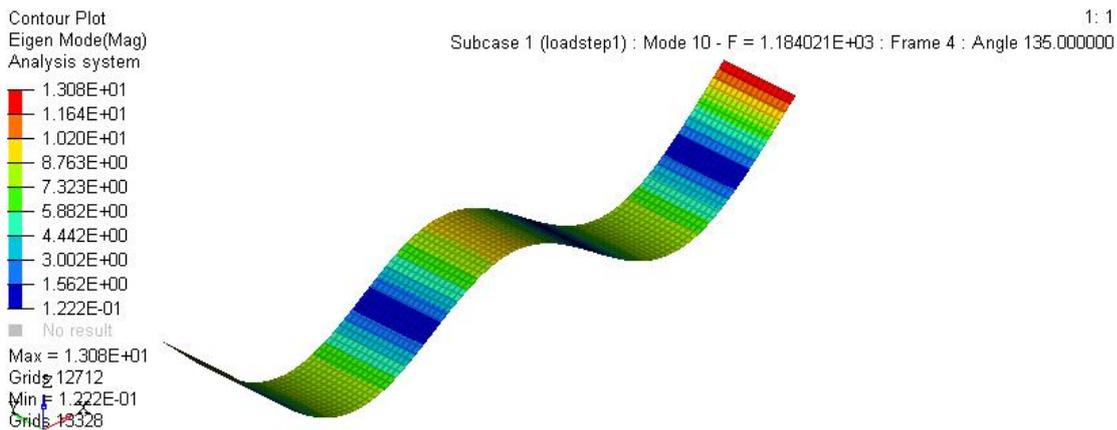
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.2** – Segundo modo de vibrar da estrutura.



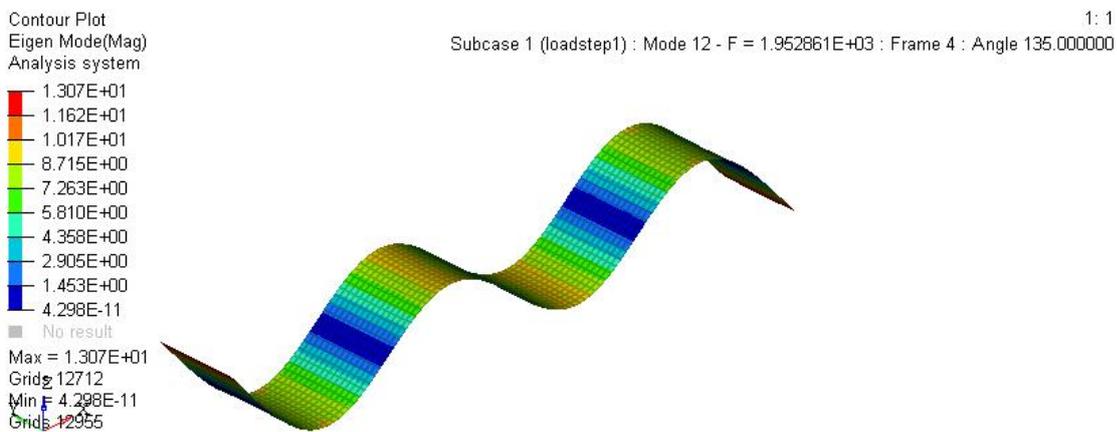
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.3** – Terceiro modo de vibrar da estrutura.



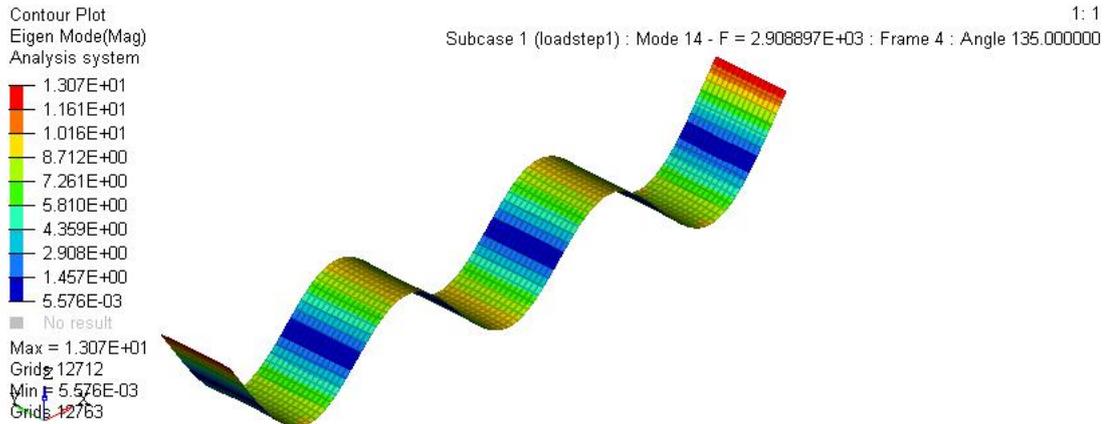
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.4** – Quarto modo de vibrar da estrutura.



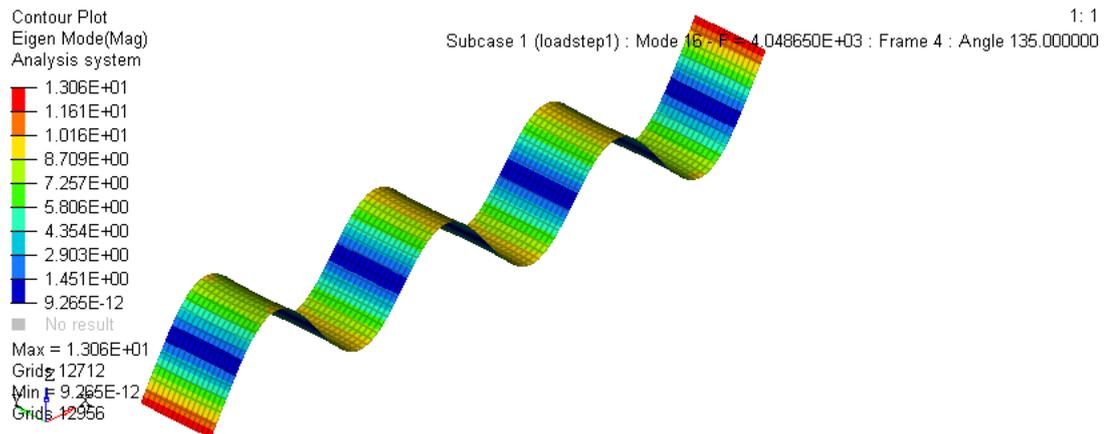
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.5** – Quinto modo de vibrar da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.6** – Sexto modo de vibrar da estrutura.



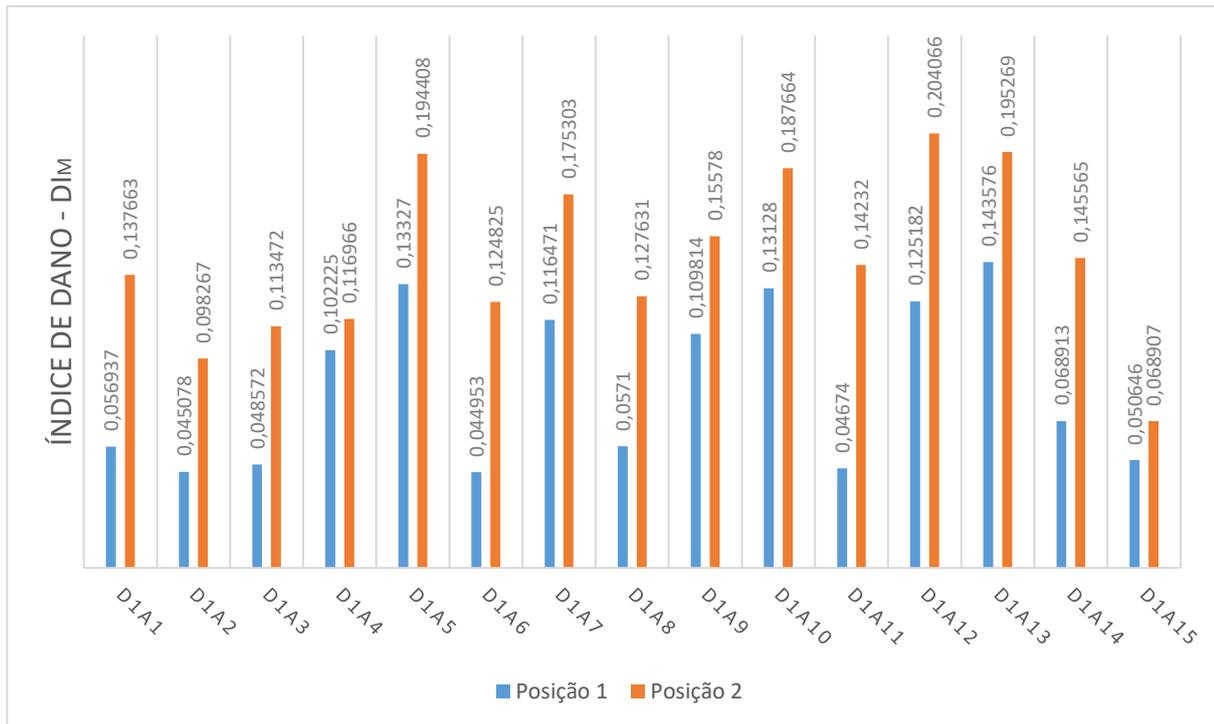
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esta análise foram considerados apenas os modos de vibrar de flexão, não sendo estudados os modos de torção da estrutura.

## 4.2 DETECÇÃO DE DANO EM VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO

Como comentado na metodologia, os métodos de detecção de dano foram aplicados em todas as vigas intactas, sendo elas comparadas com cada amostra de cada nível de dano individualmente. A Figura 4.7 apresenta os valores de DI referentes ao método de Silva *et al.* (2008),  $DI_M$ , analisando a amostra Intacta 1 como referência e comparando com todas as 15 amostras de Dano 1, para os dois pontos onde a força foi aplicada.

**Figura 4.7** –  $DI_M$  de amostra Intacta 1 com as 15 amostras de Dano 1 para os dois pontos de aplicação da força.



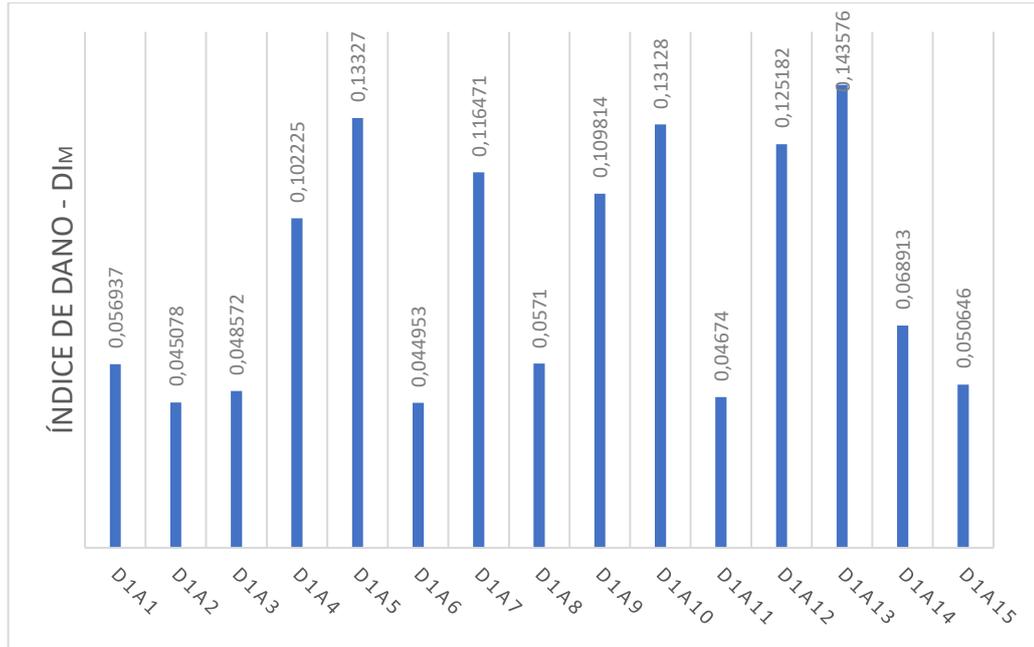
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que a posição 2 de aplicação da força é mais sensível ao dano do que a posição 1, retornando valores de  $DI$  maiores. Entretanto o comportamento dos índices de dano é parecido para as duas posições, onde as amostras que possuem valores mais altos na posição 1 também tem essa mesma característica na posição 2. Desta forma, para as próximas análises desta seção serão apresentados somente os resultados referentes à posição 1. Posteriormente, será feita uma análise mais detalhada comparando os resultados das duas posições. A Figura 4.8 apresenta os valores de  $DI_M$  para a amostra Intacta 1, comparando com todas as 15 amostras de Dano 1, para a posição 1 de aplicação da força  $H_{11}$ . É possível notar que a maior parte das amostras apresenta um valor de  $DI$  em torno de 0,05. Entretanto, algumas amostras apresentaram valores discrepantes, se aproximando de 0,1.

A Figura 4.9 apresenta os resultados de seis métodos de detecção de dano para a amostra Intacta 1, comparando-a com cada amostra de Dano 1. Dos seis métodos, cinco deles apresentaram valores comparáveis. Os métodos propostos por Maia *et al.* (2003),  $DI_{MS}$  e  $DI_{MCS}$ , retornaram valores muito elevados, impossibilitando a interpretação gráfica dos valores dos outros métodos. Sendo assim, eles não foram considerados para a análise a nível de comparação com as demais técnicas de detecção de dano.

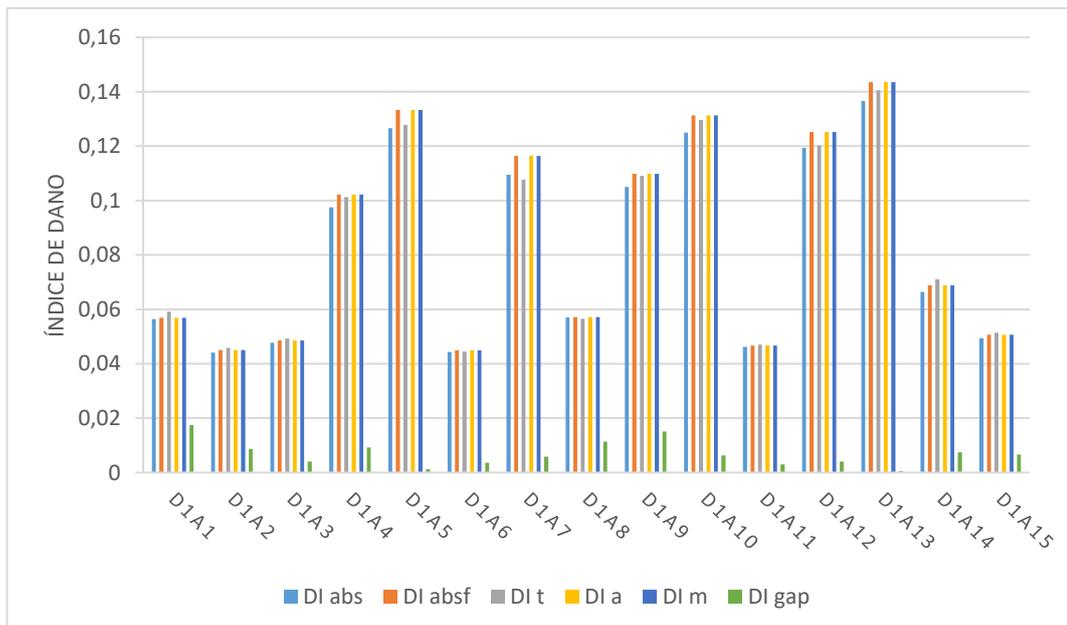
Também pode-se observar que o método proposto por De Medeiros (2015a; 2015b) apresentou valores mais baixos comparado com os outros índices, sugerindo que este método tende a minimizar o efeito do dano na estrutura. Ainda, nas amostras danificadas que retornaram os maiores valores de DI nos outros métodos, tiveram seus efeitos reduzidos drasticamente neste índice.

**Figura 4.8** –  $DI_M$  de amostra Intacta 1 com as 15 amostras de Dano 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

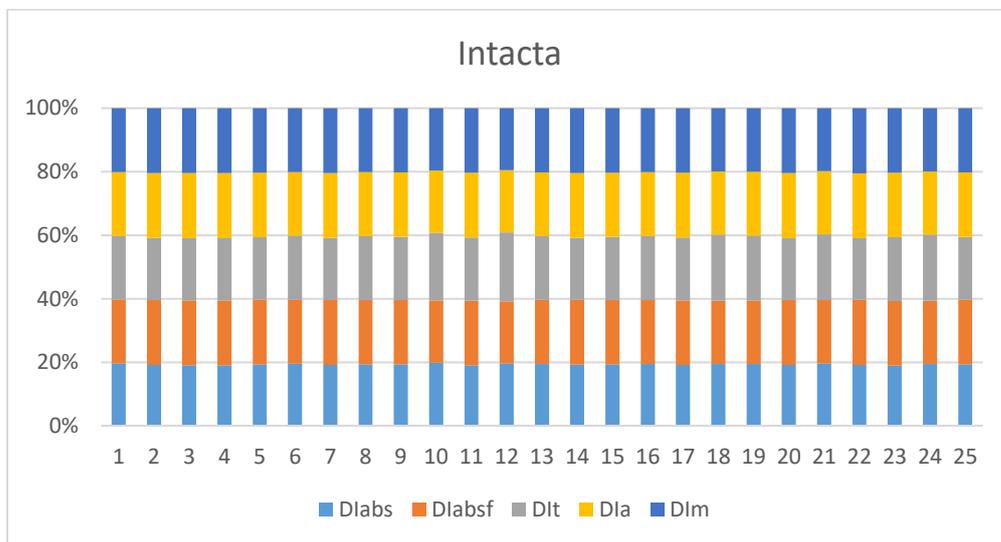
**Figura 4.9** – Comparação de seis métodos para a amostra Intacta 1 com as 15 amostras de Dano 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

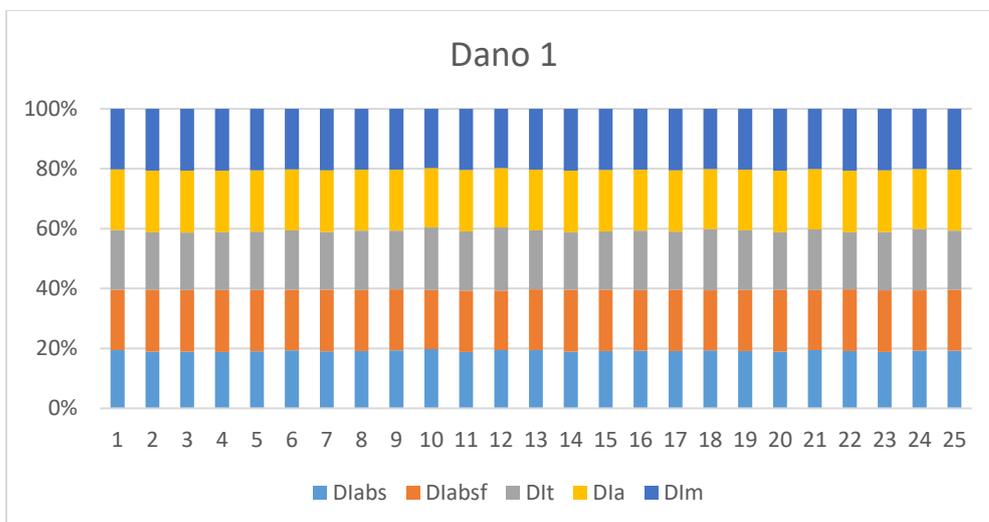
Os métodos desenvolvidos por Monaco *et al.* (2000) ( $DI_{ABS}$  e  $DI_{ABSf}$ ), Johnson e Adams (2002) ( $DI_T$ ), Mickens *et al.* (2003) ( $DI_A$ ) e Silva *et al.* (2008) ( $DI_M$ ) apresentaram comportamentos muito semelhantes, amplificando o dano de forma parecida. As amostras danificadas que destoaram da maioria retornaram valores muito parecidos para os cinco índices (amostras 4, 5, 7, 9, 10, 12 e 13). As figuras 4.10 – 4.13 fazem uma distribuição percentual de quanto um índice de dano se sobressai em relação aos outros para cada comparação realizada (Intacta  $\times$  Intacta, Intacta  $\times$  Dano 1, Intacta  $\times$  Dano 2 e Intacta  $\times$  Dano 3), e o que se pode observar é que nenhum índice domina sobre os demais, mas a distribuição percentual fica equilibrada para todos eles.

**Figura 4.10** – Distribuição percentual dos índices – Amostras Intactas.



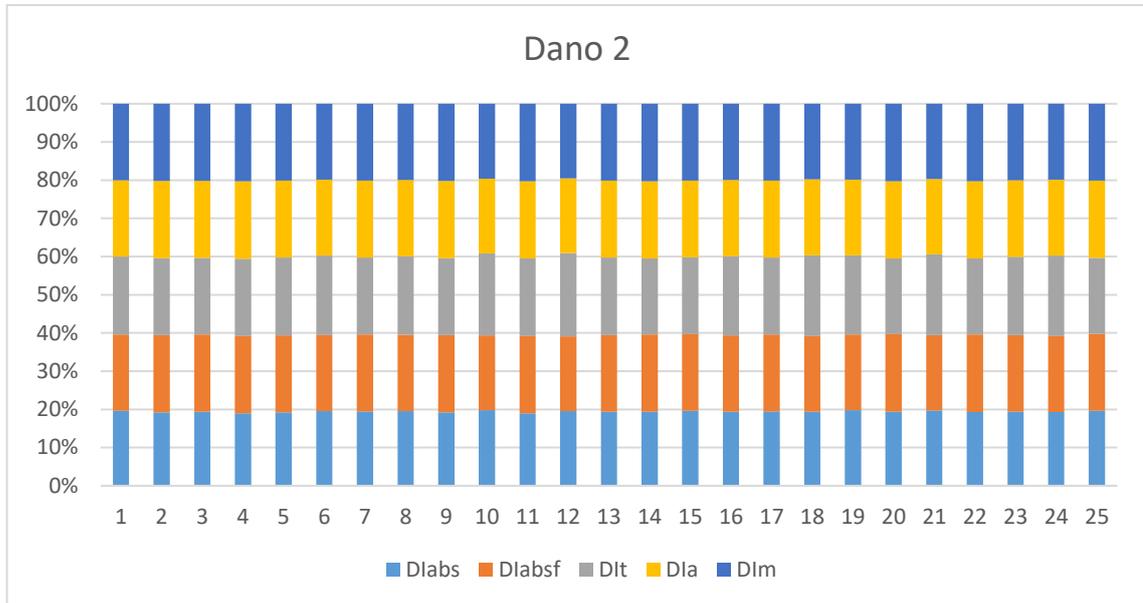
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.11** – Distribuição percentual dos índices – Amostras Dano 1.



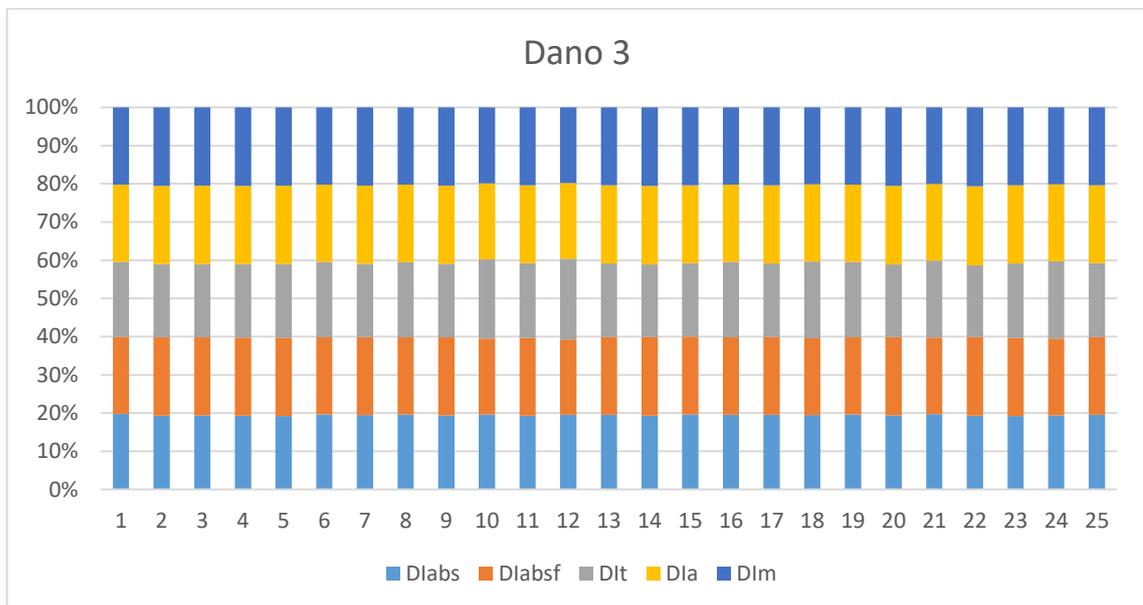
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.12** – Distribuição percentual dos índices – Amostras Dano 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

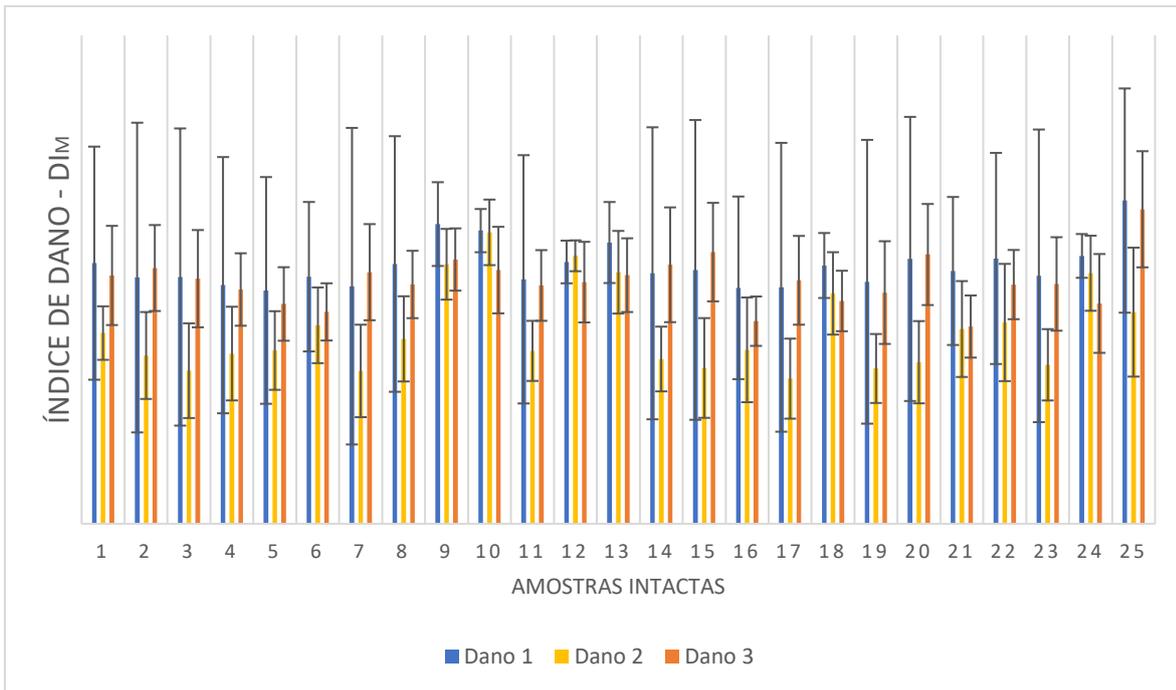
**Figura 4.13** – Distribuição percentual dos índices – Amostras Dano 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como detalhado na metodologia, a média dos índices de dano foi calculada de formas diferentes. Uma das formas foi calcular o DI médio das amostras danificadas para cada amostra intacta. A Figura 4.14 mostra os resultados obtidos fazendo este procedimento para o método de Silva *et al.* (2008).

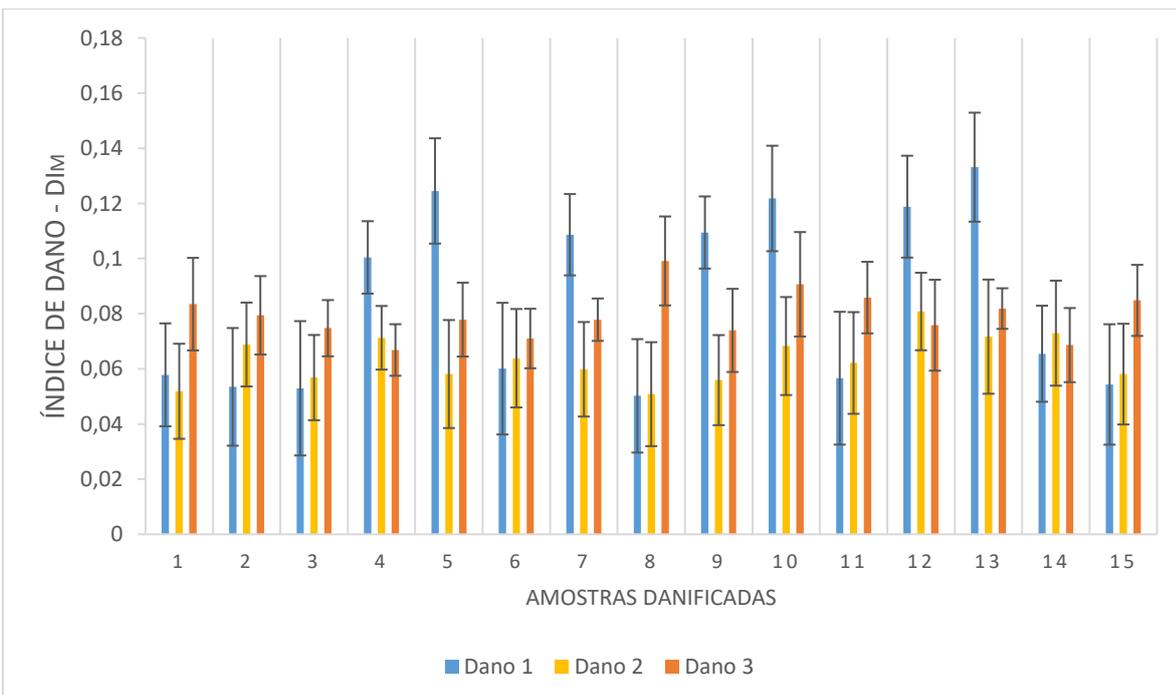
**Figura 4.14** –  $DI_M$  – Valor médio das amostras danificadas para cada amostra intacta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A outra forma foi fazer o contrário, fixar as amostras danificadas e calcular a média das amostras intactas para cada amostra danificada e para cada nível de dano. A Figura 4.15 mostra os resultados destas médias para cada dano.

**Figura 4.15** –  $DI_M$  – Valor médio das amostras intactas para cada amostra danificada.

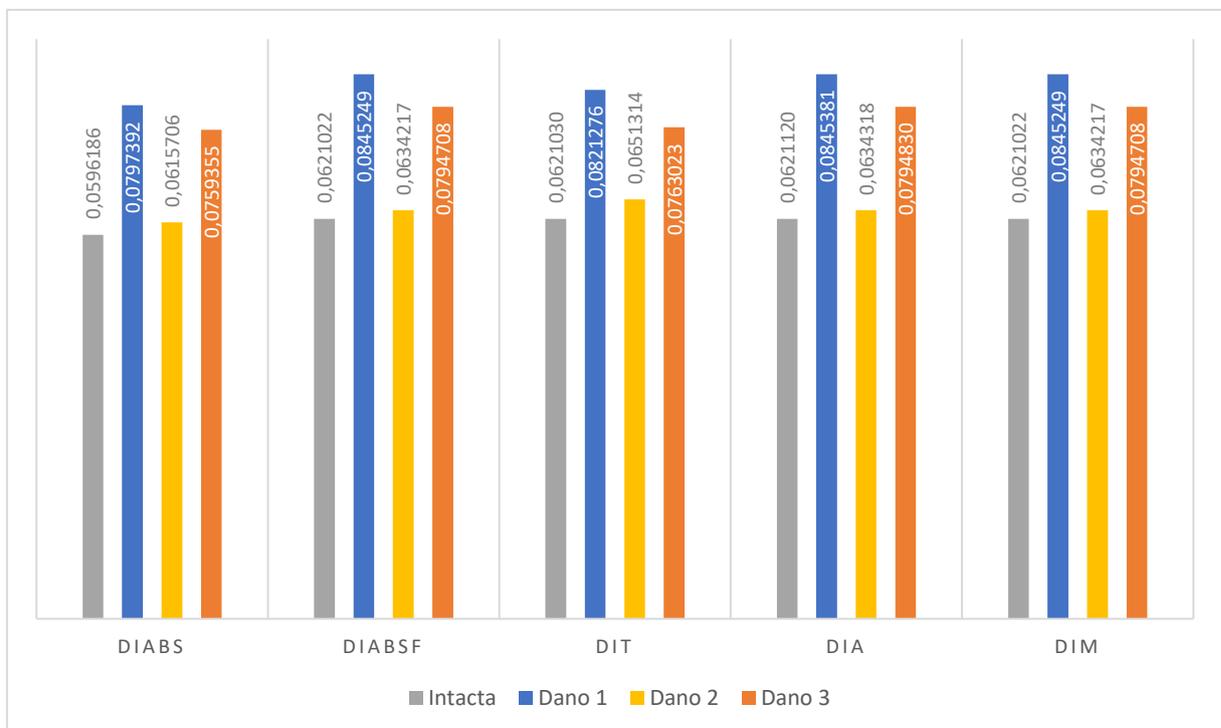


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 4.14 que os valores de DI para o Dano 1 são mais elevados que os do Dano 2 e Dano 3. Além disso, a Figura 4.15 mostra o mesmo comportamento já visto anteriormente, na qual as amostras danificadas 4, 5, 7, 9, 10, 12 e 13 referentes ao Dano 1 apresentam valores discrepantes dos demais, sendo inclusive superiores aos índices dos outros níveis de dano.

Uma comparação entre os métodos foi realizada calculando-se um índice médio para cada condição de dano da viga, incluindo a comparação Intacta  $\times$  Intacta. O resultado desta comparação pode ser visto na Figura 4.16.

**Figura 4.16** – Comparação dos índices de dano entre os métodos  $DI_{ABS}$ ,  $DI_{ABSF}$ ,  $DI_T$ ,  $DI_A$ ,  $DI_M$ .



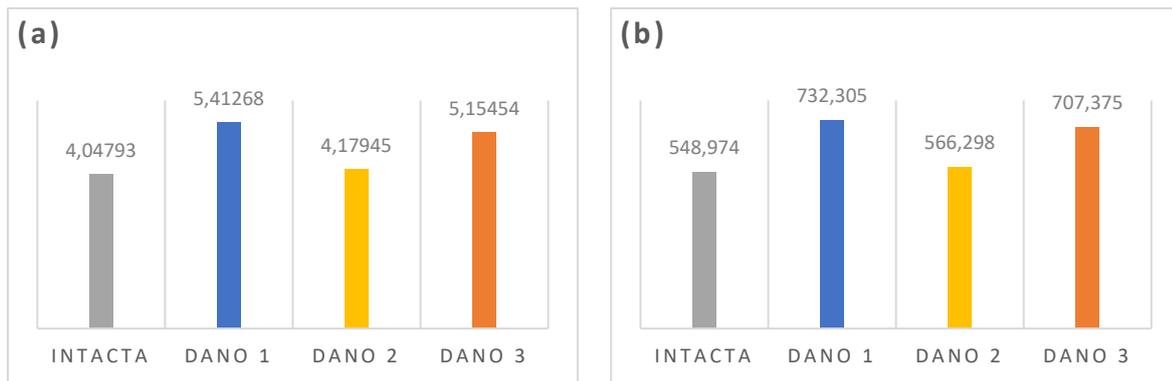
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que em todos os métodos comparados o valor do índice de dano para as amostras do Dano 1 são mais elevados que os valores dos demais níveis de dano, como já foi constatado nas outras análises. Outro ponto é que, idealmente, a comparação entre duas vigas intactas deveria retornar um valor de DI igual a zero, haja vista que não há dano em nenhuma das duas e, em teoria, elas são exatamente iguais. Entretanto pode ser notado que os índices de dano para este caso não são iguais a zero. Isto acontece pelo fato de que as vigas não são exatamente iguais. Diferenças em sua estrutura como variação dimensional e propriedades do

material interferem em cada viga individualmente, o que já é o suficiente para haver uma diferença de resposta à vibração e retornar um valor maior que zero para o DI, mesmo não havendo dano em sua estrutura.

Apesar dos índices de dano  $DI_{MS}$  e  $DI_{MSCS}$  retornarem valores muito altos em relação aos outros índices, é possível analisá-los separadamente e constatar que eles apresentam o mesmo comportamento, conforme é explicitado na Figura 4.17.

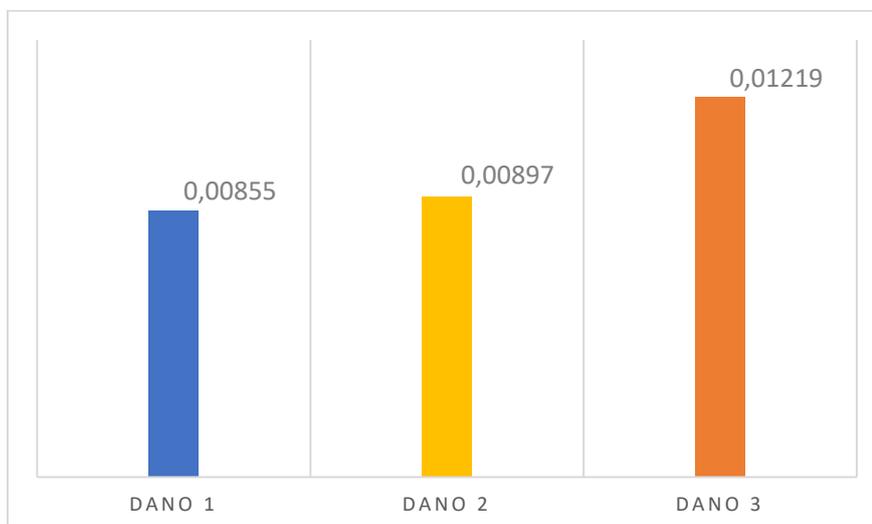
**Figura 4.17** – Índices de dano – (a)  $DI_{MS}$  e (b)  $DI_{MSCS}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Anteriormente foi constatado que o índice  $DI_{GAP}$  desenvolvido por De Medeiros (2015a; 2015b) minimizava o efeito das amostras de Dano 1 que tinham os valores de índice mais altos nos outros métodos. Sendo assim, este índice foi analisado separadamente para verificar o seu comportamento para todos os danos. A Figura 4.18 mostra o resultado deste método.

**Figura 4.18** – Índices de dano para os 3 danos -  $DI_{GAP}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que o índice  $DI_{GAP}$  retornou um resultado mais coerente com a teoria, na qual o valor do índice de dano aumenta conforme o nível do dano cresce. Esse resultado pôde ser obtido devido ao fato de que o método em questão não foi sensível às grandes variações ocorridas nas vigas do Dano 1. Ao invés disso, ele minimizou os efeitos dos *outliers*, de forma que eles não influenciaram significativamente no resultado.

Em teoria, se o nível de dano é menor, o índice de dano referente a ele também deve ser menor, entretanto, como não é este comportamento que está sendo verificado, uma análise mais aprofundada sobre as amostras de Dano 1 foi realizada, e será apresentada na próxima seção.

#### 4.3 DETECÇÃO DE DANO – AJUSTE NAS AMOSTRAS DE DANO 1

Como comentado na seção anterior, os resultados referentes aos índices do Dano 1 estavam incoerentes com a teoria, haja vista que idealmente, quanto maior for o índice de dano, maior é o dano que está afetando a estrutura. Entretanto, os resultados mostraram que apesar do Dano 1 ser o nível mais baixo de dano estudado, ele estava retornando índices maiores que os demais níveis de dano. Sendo assim, as amostras de Dano 1 foram estudadas para se entender o que estava ocasionando esta disparidade nos resultados.

Já foi mencionado anteriormente que a presença de dano não é o único fator que influencia na resposta dinâmica da estrutura, entretanto vários outros parâmetros podem influenciar no seu comportamento. Um dos parâmetros que tem influência é a variação dimensional da estrutura. Se duas vigas têm as mesmas propriedades, mesma condição de dano, mas alguma de suas dimensões difere uma da outra, isso já é o suficiente para haver variação no comportamento dinâmica delas.

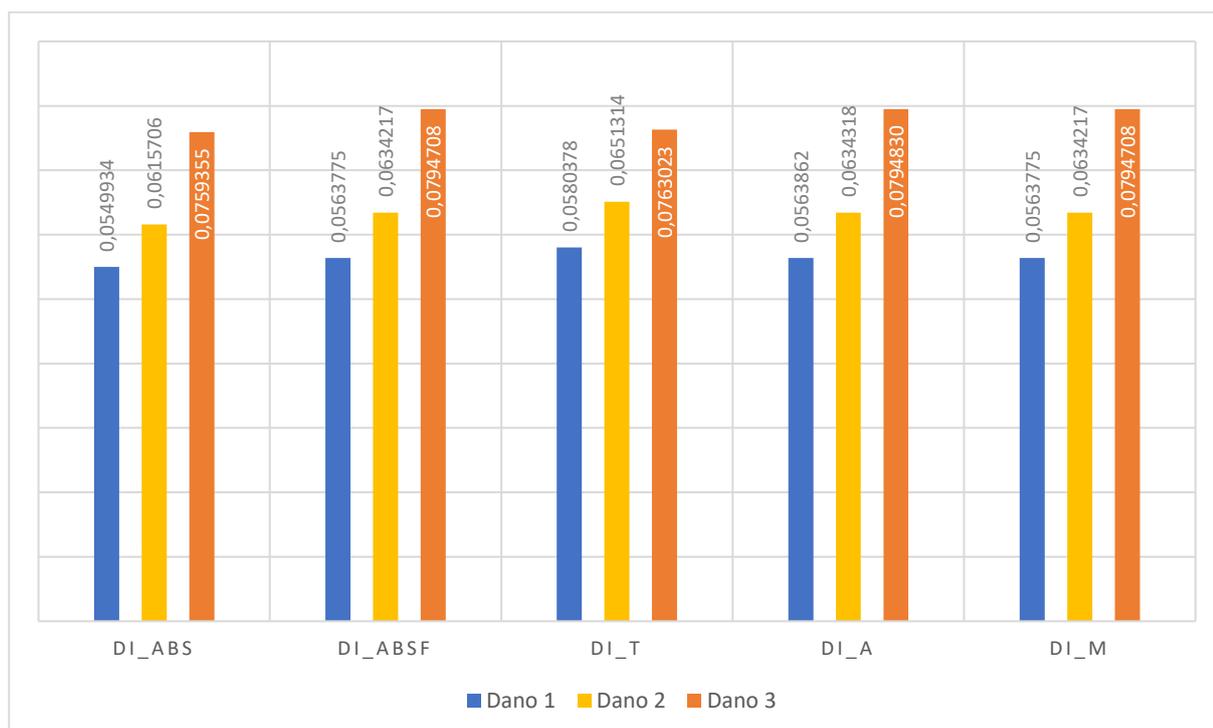
Sendo assim, as dimensões de todas as amostras de Dano 1 foram verificadas a fim de detectar alguma variação que pudesse influenciar nos resultados. A espessura média de todas as amostras analisadas é 3,00 mm. Constatou-se que as amostras 4, 5, 7, 9, 10, 12 e 13, que possuem os maiores índices de dano, também possuem espessura no mínimo 10% menor que a média. A Tabela 3.3 exibe as espessuras das amostras em questão.

**Tabela 4.1** – Espessuras das amostras com variação maior que 10%.

Amostra	Espessura (mm)
4	2,7
5	2,65
7	2,6
9	2,65
10	2,55
12	2,6
13	2,6

Fonte: Völtz (2019)

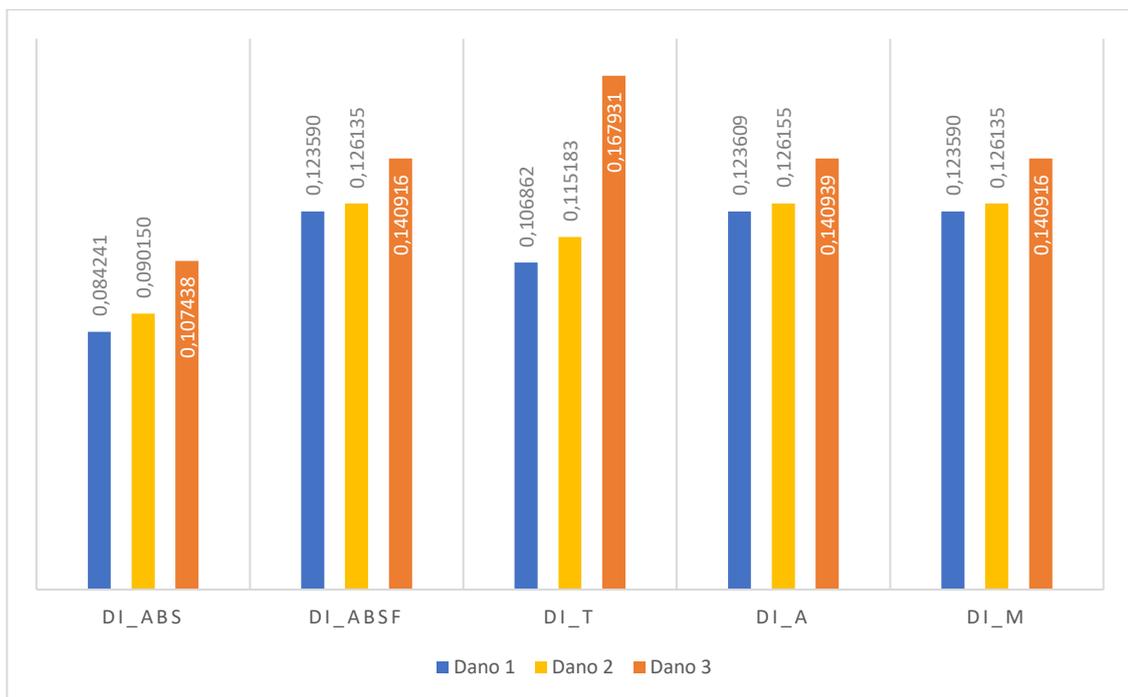
Portanto, estas amostras, mesmo sendo feitas do mesmo material e possuindo o mesmo nível de dano que as demais, apresentam espessura menor e suficiente para causar grandes alterações em suas respostas dinâmicas. Desta forma, uma nova análise foi realizada sem considerar estas amostras para os cálculos de índice de dano, a fim de verificar se os resultados seriam afetados. A Figura 4.19 apresenta os novos valores de DI para os métodos  $DI_{ABS}$ ,  $DI_{ABSF}$ ,  $DI_T$ ,  $DI_A$  e  $DI_M$ , e com a força sendo aplicada na posição 1, que já foram comparados na seção anterior.

**Figura 4.19** – Novos valores de índice de dano para os métodos  $DI_{ABS}$ ,  $DI_{ABSF}$ ,  $DI_T$ ,  $DI_A$ ,  $DI_M$  –  $H_{11}$ .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fica perceptível que sem as amostras com espessura menor o índice de dano referente ao Dano 1 muda drasticamente, se tornando o menor valor dentre os três níveis de dano calculados. Além disso, os cinco métodos comparados apresentam resultados muito parecidos, e explicam bem a progressão de dano na viga. A Figura 4.20 apresenta os resultados para os mesmos cinco métodos, mas dessa vez considerando a posição 2 de aplicação da força.

**Figura 4.20** – Novos valores de índice de dano para os métodos  $DI_{ABS}$ ,  $DI_{ABSF}$ ,  $DI_T$ ,  $DI_A$ ,  $DI_M$  –  $H_{21}$ .



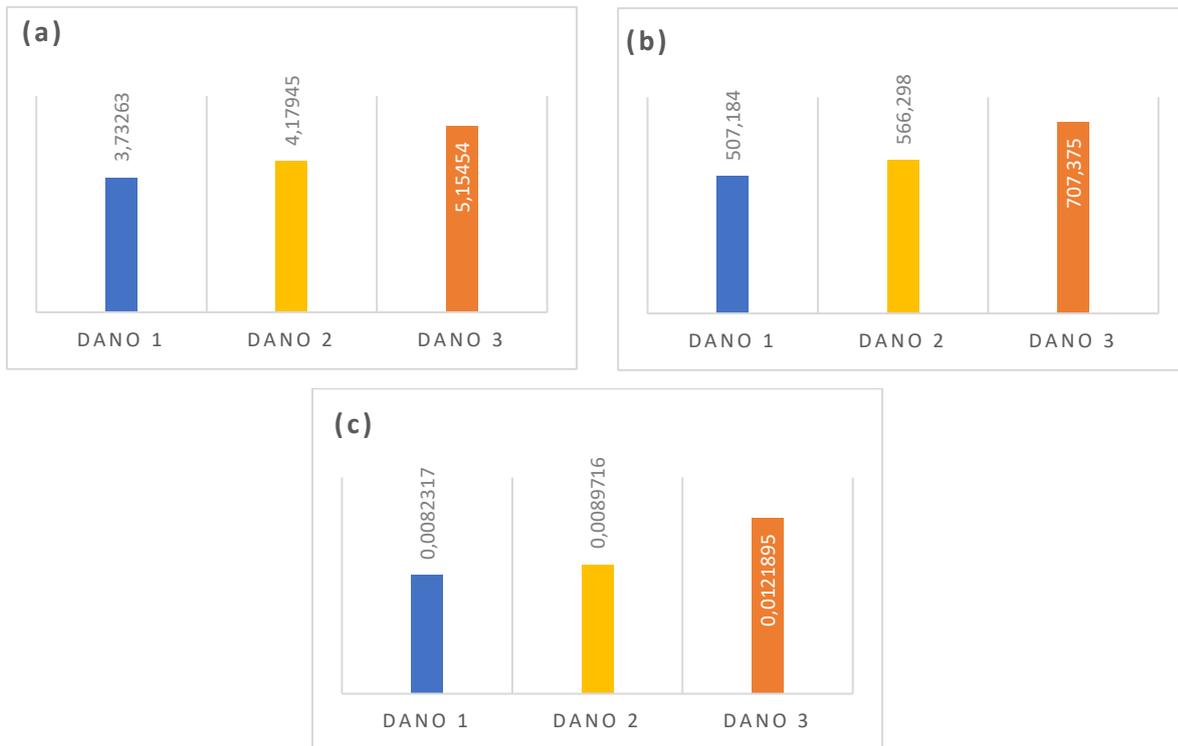
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como no caso da força aplicada na posição 1, os resultados no caso da posição 2 são condizentes com a teoria. Também foram calculados novamente os índices  $DI_{MS}$ ,  $DI_{MSCS}$  e  $DI_{GAP}$ , e são apresentados nas Figuras 4.21.

Com isso percebe-se que todos os métodos estudados apresentaram o mesmo comportamento depois que as amostras com espessura irregular foram retiradas da análise, e observa-se que conforme o nível de dano cresce, o índice de dano também aumenta.

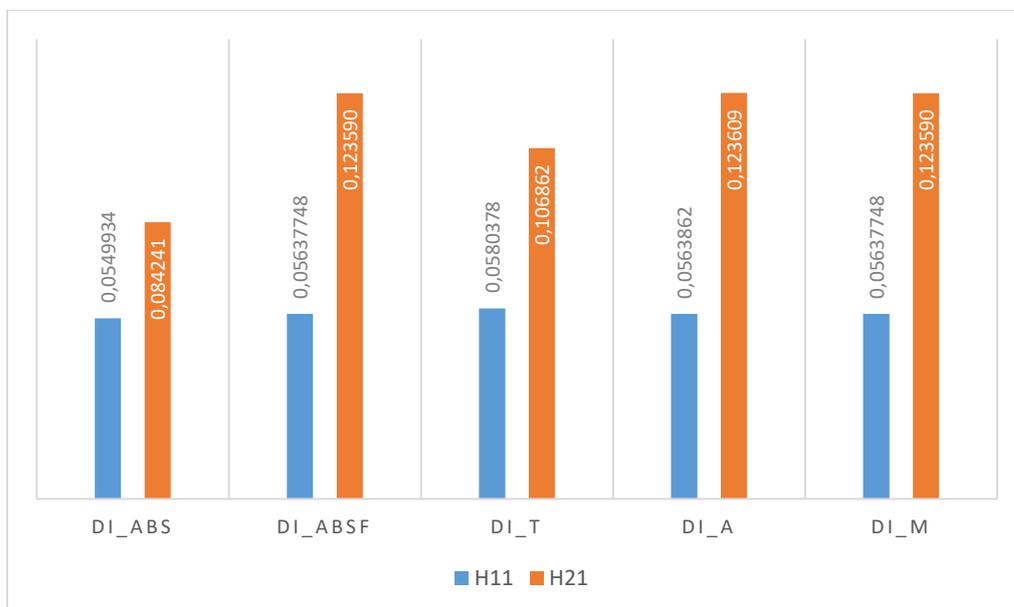
Tendo os novos índices de dano calculados, mais algumas análises podem ser feitas. As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 mostram a comparação entre os índices de dano com a aplicação da força na posição 1 e na posição 2, para o Dano 1, 2 e 3, respectivamente.

**Figura 4.21** – Novos índices de dano – (a)  $DI_{MS}$ ; (b)  $DI_{MSCS}$ ; (c)  $DI_{GAP}$ .



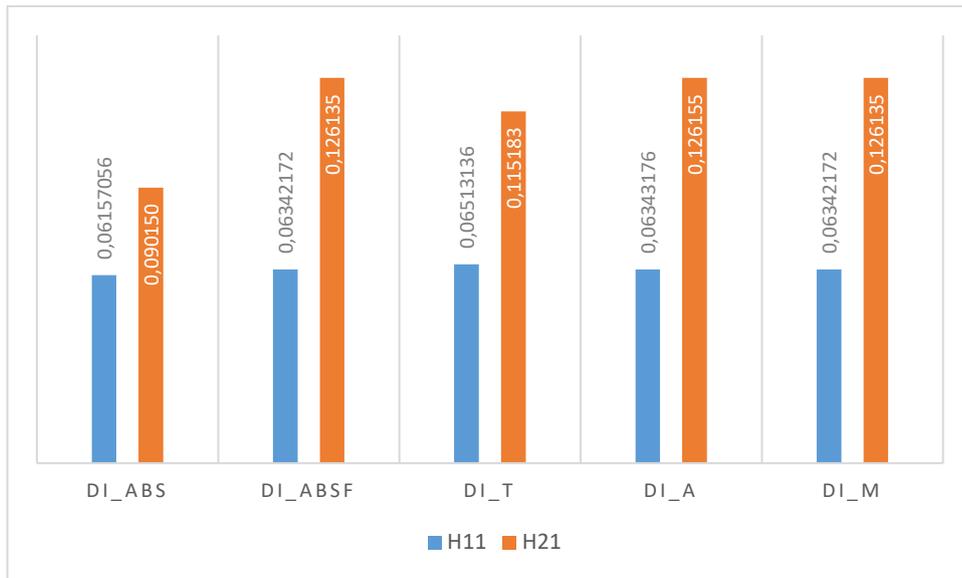
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.22** – Comparação entre  $H_{11}$  e  $H_{21}$  - Dano 1.



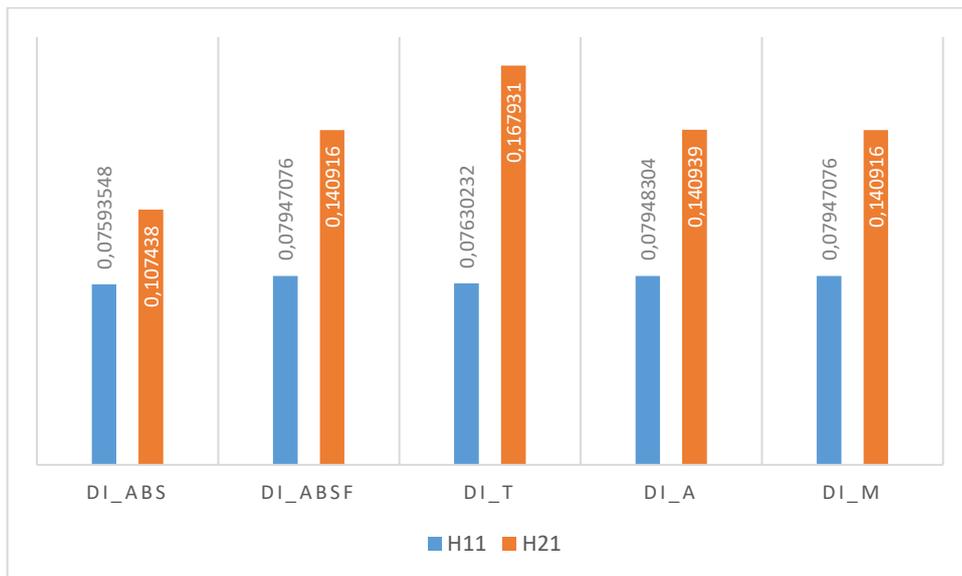
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.23** – Comparação entre H<sub>11</sub> e H<sub>21</sub> - Dano 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.24** – Comparação entre H<sub>11</sub> e H<sub>21</sub> - Dano 3.



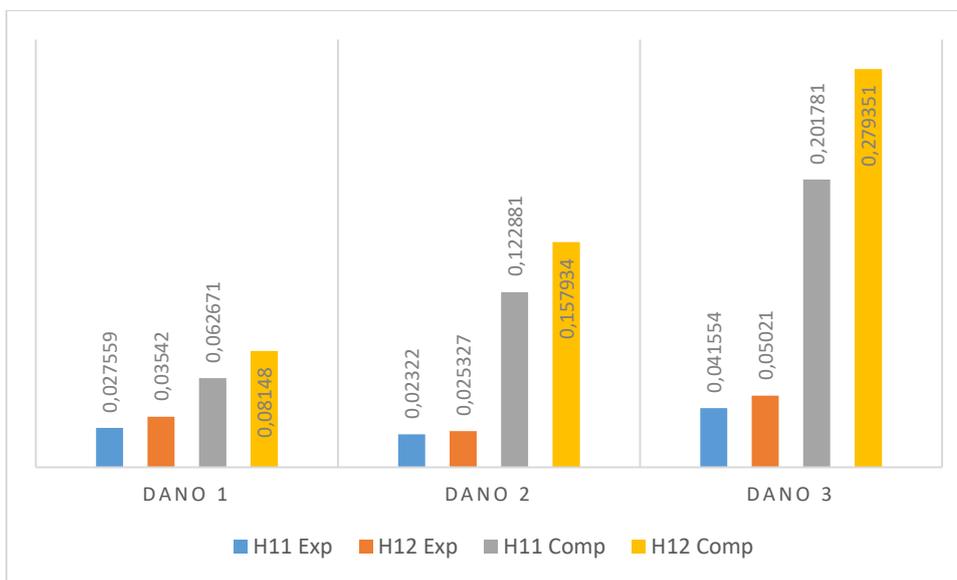
Fonte: Elaborado pelo autor.

Através das figuras pode-se observar que os métodos aplicados na posição 1 apresentam valores mais parecidos, enquanto os da posição 2 têm uma diferença maior entre os resultados de cada método. Também nota-se que os índices de dano da posição 2 são mais sensíveis ao dano do que os da posição 1. Isso pode ser explicado pelo fato de na posição 2 a força ser aplicada de um lado da viga e o acelerômetro estar posicionado do outro lado, estando o dano de delaminação entre eles, gerando assim uma interferência maior na resposta.

#### 4.4 DETECÇÃO DE DANO EM VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO – COMPUTACIONAL

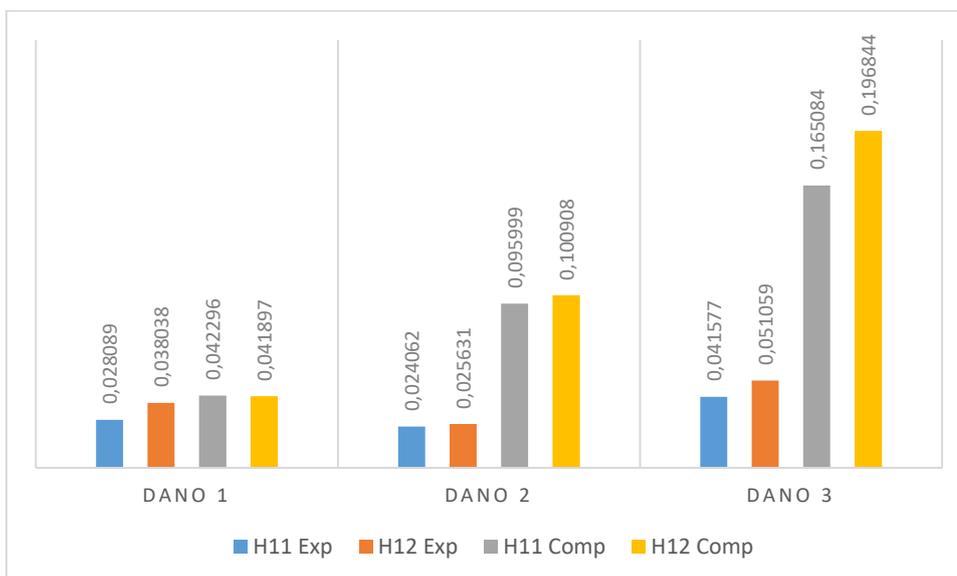
Com a análise computacional da viga de material compósito, obtiveram-se as FRFs para cada condição de dano, e estas FRFs também foram utilizadas para aplicar os métodos de detecção de dano. Para realizar a comparação com estes resultados, uma FRF média foi calculada para cada condição de dano, e os índices também foram obtidos a partir delas. As Figuras 4.25 - 4.27 mostram as comparações destes resultados para alguns métodos.

**Figura 4.25** –  $DI_{ABS}$  - Comparação entre dados experimentais e computacionais.



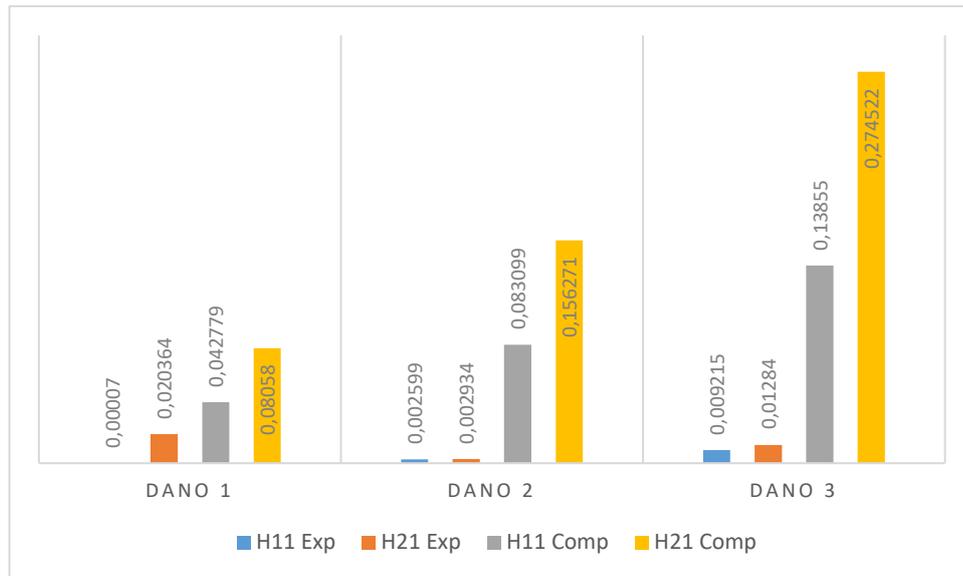
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.26** –  $DI_M$  - Comparação entre dados experimentais e computacionais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.27** –  $DI_{GAP}$  - Comparação entre dados experimentais e computacionais.



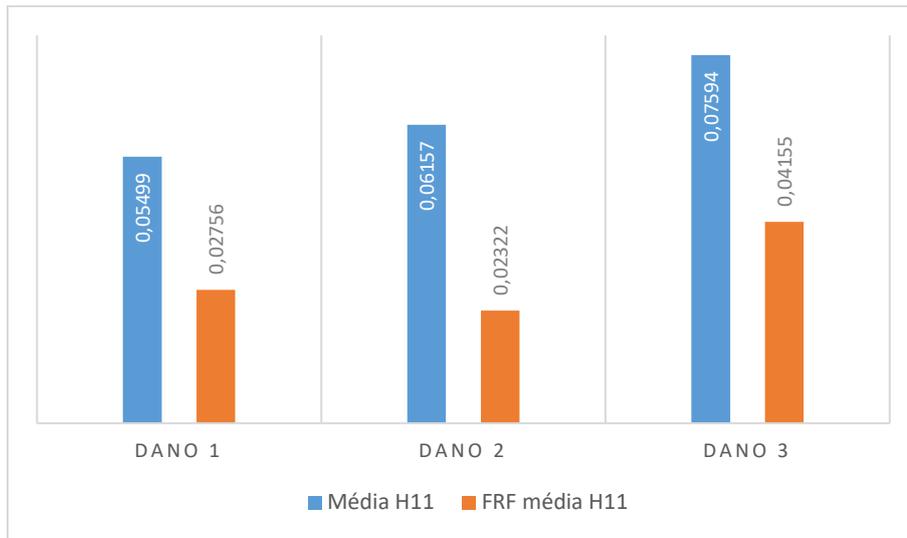
Fonte: Elaborado pelo autor.

As figuras mostram que os dados computacionais são amplificados e seguem o mesmo comportamento dos índices estudados na seção anterior, sendo possível visualizar a progressão do nível de dano através do aumento do DI. Além disso, como constatado experimentalmente, a posição 2 de aplicação da força é mais sensível ao dano do que a posição 1.

Quanto aos valores das FRFs médias, há uma distorção no resultado do Dano 2, ocorrendo uma diminuição do valor do índice para esta condição. Analisando o índice  $DI_{GAP}$ , que é calculado através da razão entre a amplitude da amostra danificada e a da amostra intacta, verifica-se que o valor do índice para o Dano 2 se aproxima de zero, o que significa que quando se faz a média das FRFs ponto a ponto, a FRF de Dano 2 se assemelha muito à FRF das Intactas.

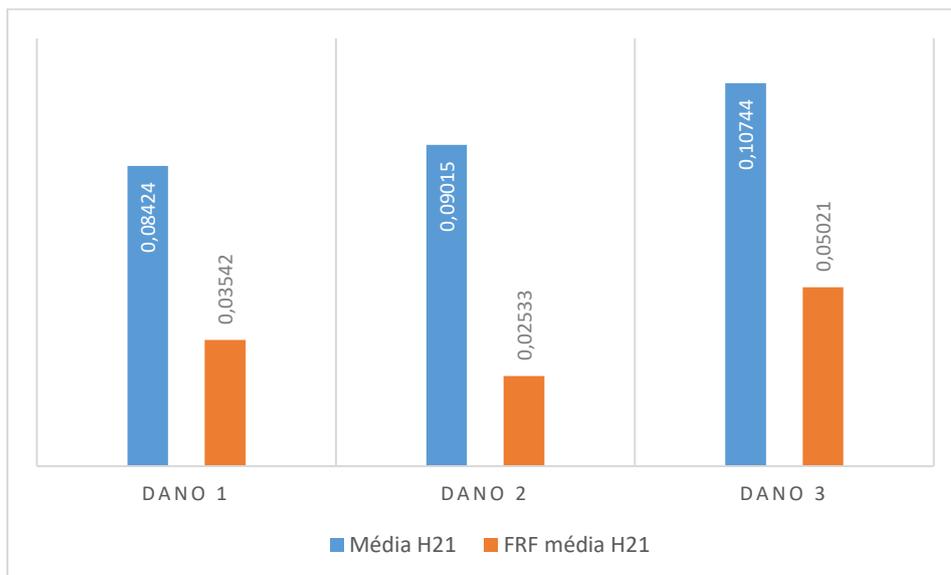
As FRFs médias ainda foram comparadas com a média dos DI para as métricas estudadas. A Figura 4.28 apresenta a comparação entre os resultados para a posição H<sub>11</sub>, e a Figura 4.29 apresenta a mesma comparação para a posição H<sub>21</sub>. O que se observa é que os índices referentes à média dos índices de dano de cada condição são maiores que os índices obtidos pela FRF média, o que mostra que, quando calculada a FRF média, as diferenças das FRFs entre cada condição são reduzidas. O comportamento das médias dos índices de dano é coerente com a teoria, o que já era esperado, haja vista que se trata da média dos índices de cada condição de dano, e como visto anteriormente, estes índices já apresentavam este comportamento.

**Figura 4.28** –  $DI_{ABS}$  - Comparação entre a média dos DI e o DI para a FRF média – Posição  $H_{11}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.29** –  $DI_{ABS}$  - Comparação entre a média dos DI e o DI para a FRF média – Posição  $H_{21}$ .

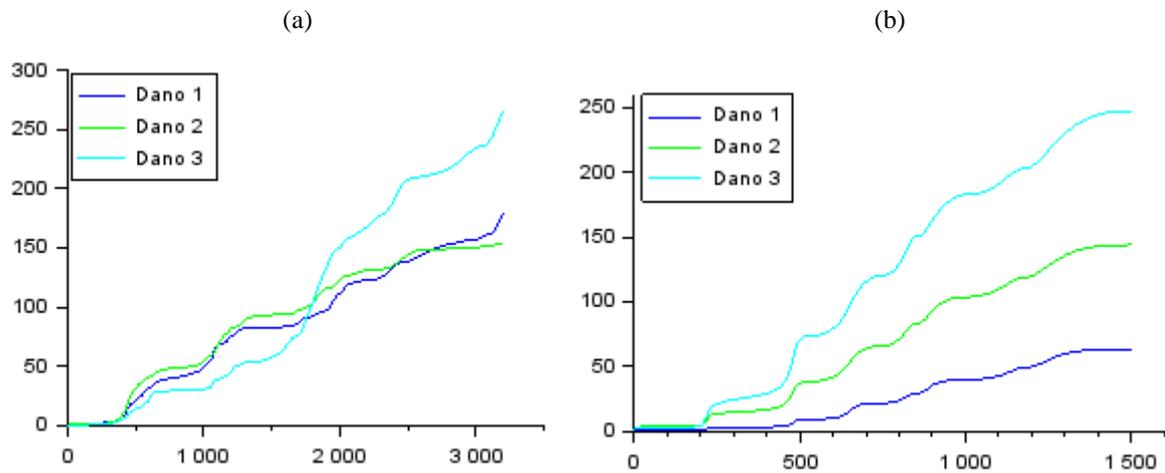


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 EVOLUÇÃO DO ÍNDICE DE DANO EM VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO

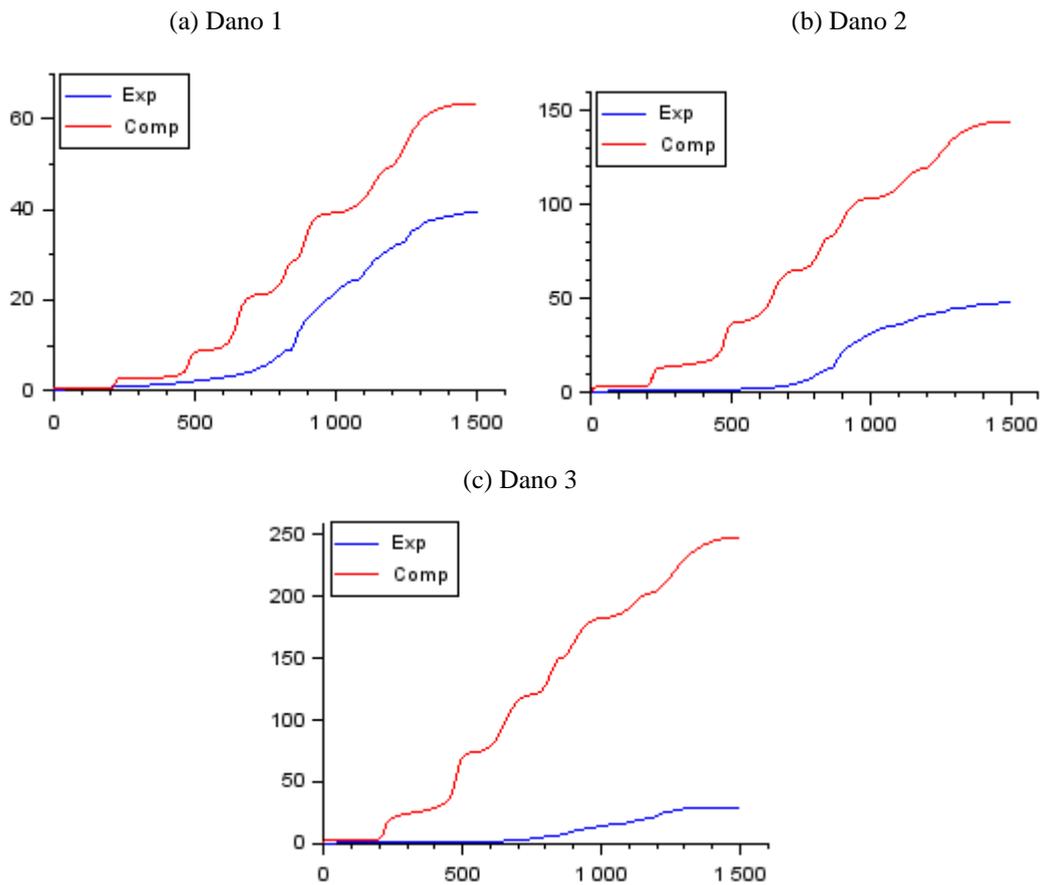
Foi avaliada também a evolução do índice de dano em função da frequência. Para esta análise foram usadas as FRFs médias para a posição 1 e as FRFs computacionais, para o Dano 1, Dano 2 e Dano 3, e foi calculado o índice  $DI_{ABS}$ . A Figura 4.30 mostra as evoluções do índice com os dados experimentais e computacionais, e a Figura 4.31 apresenta a comparação entre o experimental e o computacional para cada dano separadamente.

**Figura 4.30** – Evolução do índice de dano  $DI_{ABS}$  – (a) Experimental; (b) Computacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.31** – Comparação da evolução de  $DI_{ABS}$  experimental e computacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 4.30 e 4.31 evidenciam a diferença de evolução do índice de dano entre os dados experimentais e os computacionais. Os dados computacionais apresentam degraus de

crescimento, na qual o índice de dano dá alguns saltos conforme o aumento da frequência. Este comportamento não é encontrado nos dados experimentais, que por sua vez apresentam um crescimento do índice mais suave, sem evidenciar grandes saltos. Esta diferença de comportamento se dá principalmente pelo fato de na análise computacional o modelo apresentar condições ideais, tais como dimensões sem variação e propriedades do material constantes. Além disso, no modelo computacional o defeito não é perfeitamente representado, haja vista que no caso da delaminação haverá momentos em que as duas camadas adjacentes, que a princípio eram para estar separadas uma da outra, entrarão em contato, proporcionando uma configuração diferente e alterando a resposta. Entretanto, como o modelo computacional representa a situação ideal, estas variações de comportamento não são completamente representadas.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, diferentes métricas de detecção de dano foram analisadas com o intuito de se verificar a capacidade de cada uma delas de identificar o dano na estrutura. O objetivo do estudo foi alcançado, haja vista que foi possível identificar a influência do dano em vigas de material compósito através da análise das Funções de Resposta em Frequência (FRF's) da estrutura. Observou-se que a presença de dano, que neste trabalho utilizou a delaminação na viga, altera o comportamento dinâmico da estrutura, e as técnicas desenvolvidas para identificar estas alterações conseguiram retornar resultados condizentes.

Num primeiro momento, os resultados de algumas amostras estavam destoando do restante, gerando inconsistência nos resultados, pois as amostras de Dano 1, que era a menor condição de dano estudada, estava apresentando os maiores índices, o que caracterizaria o maior dano presente, o que não é verdade. Então uma análise mais aprofundada nestes resultados permitiu a constatação experimental de que a presença de dano não é o único parâmetro que pode influenciar a resposta dinâmica da estrutura. Foi observado que as vigas que possuíam espessura no mínimo 10% menor que a média estavam apresentando comportamento dinâmico muito diferente das demais, influenciando fortemente nos resultados e distorcendo os índices referentes ao Dano 1.

Com a nova análise, desconsiderando as amostras descritas no parágrafo anterior, foi possível concluir acerca dos métodos aplicados para detectar os danos nas vigas. Cinco métodos de detecção de dano ( $DI_{ABS}$ ,  $DI_{ABSf}$ ,  $DI_T$ ,  $DI_A$  e  $DI_M$ ) apresentaram resultados muito parecidos, e todos os métodos estudados retornaram valores com o mesmo comportamento, mudando apenas o nível de amplificação do resultado, o que fortalece a confiabilidade do monitoramento de integridade estrutural, haja vista que todos os métodos foram capazes de identificar a presença de dano nas vigas.

Outro ponto que foi constatado são os índices de dano retornarem valores diferentes de zero mesmo quando foram comparadas as vigas intactas com elas mesmas. No caso ideal, as vigas teriam as mesmas dimensões, mesmas propriedades e estariam livres de defeitos a nível microscópico, mas na realidade, cada amostra possui variação em diversos parâmetros que afetam o seu comportamento dinâmico, como os que foram citados. Estas variações influenciam na resposta da estrutura à vibração e, desta forma, tem-se um delta na resposta de

duas vigas intactas diferentes, o que acarreta num índice de dano não nulo, e explica os resultados obtidos relacionados a esta análise.

As vigas tiveram forças aplicadas em duas posições diferentes, e os resultados das duas posições apresentaram comportamento semelhante, mas amplitudes diferentes. Foi constatado que, enquanto na posição 1 a força foi aplicada no mesmo ponto que o acelerômetro estava posicionado, no caso da posição 2 a força foi aplicada de um lado da delaminação e o sinal captado na outra extremidade, ficando suscetível a uma interferência maior do dano na resposta, o que justifica os valores de índice de dano mais elevados para esta posição.

Por fim, os resultados obtidos através dos dados computacionais reforçaram o que já havia sido constatado experimentalmente, apresentando o mesmo comportamento em relação aos danos e em relação às posições de aplicação da força. Quanto à evolução do dano, os resultados computacionais apresentaram degraus de evolução em função da frequência, enquanto os dados experimentais não tiveram estes saltos, mas sim um crescimento contínuo do índice de dano acumulado.

Para a realização de trabalhos futuros seguindo a mesma linha de estudo, recomenda-se:

- Analisar outras métricas de detecção de dano, inclusive utilizando outros parâmetros além da amplitude, como por exemplo a fase;
- Estudar outros tipos de dano que podem ocorrer na estrutura de material compósito além da delaminação;
- Aprimorar os modelos computacionais e realizar análises propondo diferentes configurações do modelo, como mudar a orientação do laminado e a posição do dano de delaminação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, D. **Health monitoring of structural materials and components: Methods with applications**. 1 ed. John Wiley & Sons, New York, 2007.
- ALMEIDA, M. T. **Vibrações mecânicas para engenheiros**. São Paulo: Edgard Blücher. 1987.
- BALACHANDRAN, B. et al. **Vibrações Mecânicas**. 2ª edição. São Paulo: Cengage Learning. 2011.
- BAPTISTA, F. G. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, 2010.
- BOLOTIN, V. V. **Mechanics of delaminations in laminate composite structures**. *Mechanics of Composite Materials*, v.37, n. 5-6, p. 367-380, 2001.
- CHUNG, D. D. **Composite materials: science and applications**. [s.l.]: Springer Science & Business Media, 2010.
- DE MEDEIROS, R.; LOPES, H.M.R.; GUEDES, R.M.; VAZ, M.A.P.; VANDEPITTE, D.; TITA, V. **A new approach for SHM system: combination of vibration based method and shearography speckle**. In: 5th International Symposium on Solid Mechanics (MecSol2015), Belo Horizonte, Brasil, 2015a.
- DE MEDEIROS, R.; LOPES, H.M.R.; GUEDES, R.M.; VAZ, M.A.P.; VANDEPITTE, D.; TITA, V. **A new methodology for structural health monitoring applications**. *Procedia Engineering*, v. 114, p. 54-61, 2015b.
- DE MEDEIROS, R. **Development of a criterion for predicting residual strength of composite structures damaged by impact loading**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2016.
- FAN, W.; QIAO, P. **Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study**. *Structural Health Monitoring*, v.10, n.1, p.83-111, 2011.
- JOHNSON, T.J.; ADAMS, D.E. **Transmissibility as a differential indicator of structural damage**. *Journal of Vibration and Acoustics*, v.124, n.4, p.634, 2002.
- LOPES, H. R. et al. **A numerical-experimental method for damage location based on rotation fields spatial differentiation**. *Computers & Structures, Elsevier*, v. 89, n. 19-20, p. 1754-1770, 2011.

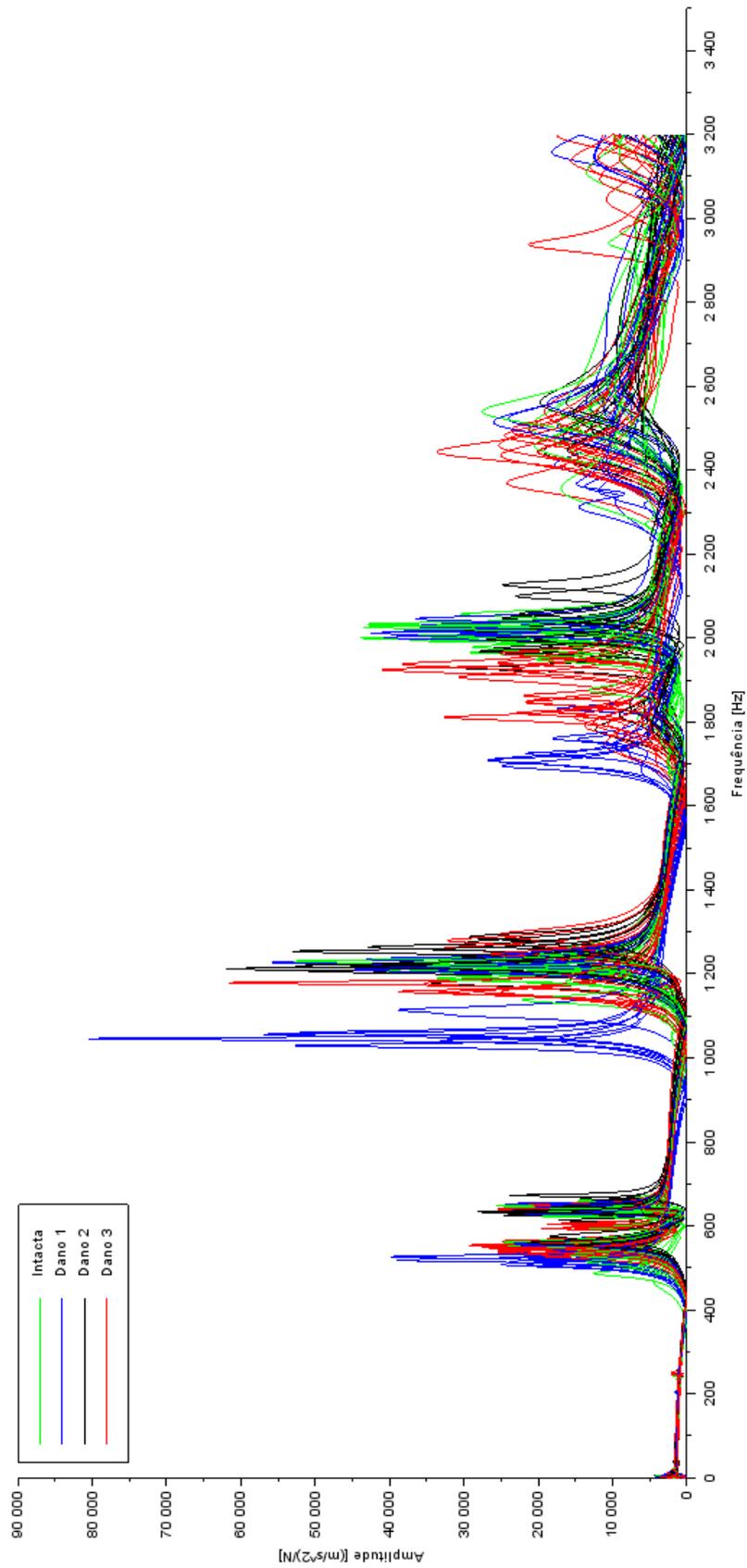
- MAIA, N.; SILVA, J.M.M.; ALMAS, E.A.M.; SAMPAIO, R.P.C. **Damage detection in structures: from mode shape to frequency response function methods**. Mechanical Systems and Signal Processing, v.17, n.3, p.489-498, 2003.
- MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites materials, manufacturing, and design**. [s.l.]: CRC press, 2007.
- MENDONÇA, P. de T.R. **Materiais compostos & estruturas-sanduiche: projeto e análise**. 1.ed. Barueri, SP: Manole, 2005.
- MICKENS, T.; SCHULZ, M.; SUNDARESAN, M.; GHOSHAL, A.; NASER, A.S.; REICHMEIDER, R. **Structural health monitoring of an aircraft joint**. Mechanical Systems and Signal Processing, v.17, n.2, p.285-303, 2003.
- MONACO, E.; FRANCO, F.; LECCE, L. **Experimental and numerical activities on damage detection using magnetostrictive actuators and statistical analysis**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.11, n.7, p.567-578, 2000.
- RAO, S.S. **Vibrações mecânicas**. 4ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2008.
- REDDY, J.N. **Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis**. [s.l.]: CRC press, 2004.
- SALGADO, J. M. S. O. **Análise Modal Experimental Aplicada a Um Componente Estrutural Automóvel**. Universidade do Minho. 2012.
- SILVA, S.; DIAS JÚNIOR, M.; LOPES JUNIOR, V. **Structural health monitoring in smart structures through time series analysis**. Structural Health Monitoring, v.7, n.3, p.231-244, 2008.
- TALREJA, R.; VARNA, J. **Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials**. [s.l.]: Elsevier, 2015
- VÖLTZ, L. R. **Fault Diagnosis in Composite Structures Using Artificial Neural Network and Principal Component Analysis**. Tese (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, 2019.
- WORDEN, K.; DULIEU-BARTON, J. M. **An overview of intelligent fault detection in systems and structures**. Structural Health Monitoring, Newbury Park, v. 3, n. 1, p. 85-98, 2004.

## ANEXOS

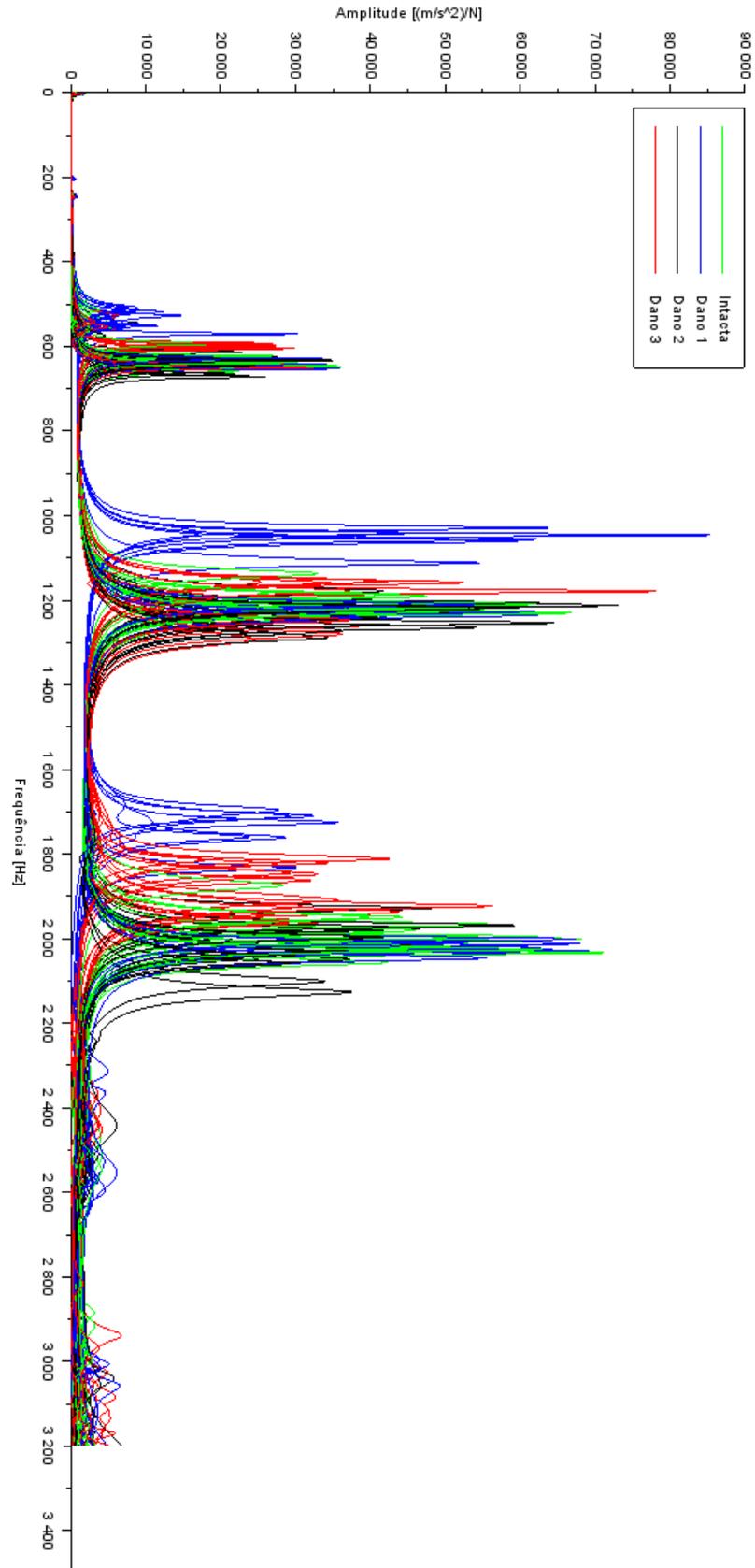
**Tabela A.1** – Dimensões das vigas analisadas.

Viga	Largura (mm)	Comprimento (m)	Espessura (mm)	Viga	Largura (mm)	Comprimento (m)	Espessura (mm)
1	28,10	0,229	3,00	38	28,70	0,227	2,60
2	28,40	0,229	2,90	39	28,30	0,226	3,10
3	28,50	0,228	3,00	40	28,55	0,227	3,05
4	28,55	0,228	3,00	41	28,40	0,227	3,20
5	28,55	0,227	2,90	42	28,55	0,227	3,00
6	28,30	0,229	2,90	43	28,35	0,227	3,00
7	28,30	0,228	3,10	44	28,15	0,226	3,20
8	28,40	0,228	2,95	45	28,40	0,226	3,10
9	28,30	0,228	2,90	46	28,05	0,227	3,10
10	28,50	0,228	2,90	47	28,30	0,227	3,20
11	28,30	0,229	2,95	48	28,30	0,227	3,00
12	28,30	0,227	2,65	49	28,30	0,227	3,00
13	28,45	0,228	2,90	50	28,40	0,227	3,15
14	28,55	0,227	2,95	51	28,20	0,226	3,15
15	28,55	0,228	2,95	52	28,20	0,227	3,15
16	28,35	0,228	2,80	53	28,35	0,227	3,10
17	28,35	0,229	2,90	54	28,55	0,227	3,20
18	29,40	0,228	2,95	55	28,30	0,227	3,00
19	28,40	0,228	2,90	56	28,30	0,227	2,95
20	28,50	0,227	2,90	57	28,30	0,229	3,15
21	29,30	0,228	2,90	58	28,00	0,228	3,20
22	28,70	0,228	2,90	59	28,15	0,229	3,15
23	28,00	0,229	2,95	60	28,05	0,229	3,35
24	28,60	0,227	2,80	61	22,35	0,230	3,15
25	28,60	0,227	3,05	62	28,30	0,230	3,35
26	28,40	0,227	3,05	63	28,05	0,230	3,35
27	28,55	0,226	3,05	64	27,90	0,229	3,00
28	28,55	0,226	3,05	65	28,00	0,229	3,15
29	28,55	0,226	2,70	66	28,45	0,230	3,00
30	28,55	0,227	2,65	67	28,35	0,229	3,10
31	28,60	0,226	3,00	68	28,30	0,230	3,05
32	28,50	0,227	2,60	69	28,05	0,229	3,35
33	28,60	0,226	2,95	70	28,10	0,229	3,35
34	28,60	0,226	2,65	71	28,30	0,230	3,05
35	28,60	0,227	2,55	72	28,40	0,230	3,05
36	28,30	0,226	2,95	73	28,40	0,230	3,10
37	28,55	0,227	2,60	-	-	-	-

Fonte: Völtz (2019).

**Figura A.1** – FRFs experimentais para todas as condições de dano: posição H11

Fonte: Völtz (2019).

**Figura A.2** – FRFs experimentais para todas as condições de dano: posição H21

Fonte: Völtz (2019).