UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA PROJETO DE GRADUAÇÃO

BRUNELA BRAGA MONTEIRO

Análise Modal de Vigas Engastadas para Identificação das Propriedades Mecânicas de três Fibras de Carbono utilizando para Validação Computacional o Método dos Elementos Finitos

> VITÓRIA 2014

BRUNELA BRAGA MONTEIRO

Análise Modal de Vigas Engastadas para Identificação das Propriedades Mecânicas de três Fibras de Carbono utilizando para Validação Computacional o Método dos Elementos Finitos

Projeto de graduação apresentado ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Luís Teixeira

VITÓRIA 2014

BRUNELA BRAGA MONTEIRO

Análise Modal de Vigas Engastadas para Identificação das Propriedades Mecânicas de três Fibras de Carbono utilizando para Validação Computacional o Método dos Elementos Finitos.

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 06 de julho de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rafael Luís Teixeira UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO Orientador

Prof. Dr. Márcio Coelho de Mattos UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO Examinador

Prof. Dr. Fernando César Meira Menandro UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo, por ter me guiado até aqui.

À minha avó por todo amor, carinho e paciência, sempre me apoiando em todas as decisões tomadas ao longo destes anos.

A toda a minha família e irmãos em Cristo pelas orações incessantes.

Aos amigos e colegas da UFES, que estiveram sempre ao meu lado, estudando para provas e compartilhando experiências dentro e fora da universidade, e em especial ao Lucas Perpétuo, meu namorado e colega, que sempre me ajudou.

A todos os professores, em especial ao Prof. Dr. Rafael Luís Teixeira pela orientação e paciência.

RESUMO

Esse trabalho propõe uma metodologia para identificação das propriedades mecânicas de três tipos de fibras de carbono (são elas: unidirecional, bidirecional e aramida da marca Kevlar) quando fixadas em vigas de aço inoxidável. Inicialmente, é feita a análise modal das vigas engastadas com e sem fibra de carbono. As vigas são excitadas por um martelo de impacto e, com um sensor LVDT, são medidos os deslocamentos das vibrações. Com esses dados experimentais, através de um analisador de espectro, são obtidas as três primeiras frequências para cada um dos quatro casos pesquisados. Primeiramente, foi feita a análise modal da viga de aço inoxidável sem a fibra de carbono e a validação computacional com um modelo em elementos finitos. Posteriormente, foram feitas análises modais da viga de aço inoxidável com três diferentes tipos de fibra de carbono que são colados na viga com uma resina apropriada. Com isso, foi possível a obtenção experimental das três primeiras frequências para cada caso. Finalmente, com o modelo em elementos finitos validado para a viga de inoxidável, desenvolveram-se três modelos anexando ao programa validado o composto: resina e fibra de carbono, para os três casos estudados. Foi possível então ajustar os valores do módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a densidade dos materiais compósitos, ou seja, as fibras de carbono juntamente com a resina. A metodologia apresentou valores confiáveis, o que permitirá o desenvolvimento de projetos que utilizam esses materiais compósitos com as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente.

Palavras-Chave: Identificação de Propriedades de Materiais Compósitos, Análise Modal e Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

This work proposes a methodology to identify the mechanical properties of three types of carbon fibers (which are: unidirectional, bidirectional, and aramid of Kevlar brand) when fixed in stainless steel beams. Initially, modal analysis of the embedded beams with and without carbon fiber is performed. The beams are excited by an impact hammer, and with an LVDT sensor, the vibrations displacements are measured. With these experimental data, using a spectrum analyzer, the first three frequencies are obtained for each of the four cases studied. First, the modal analysis and the computational validation with a finite element model of the stainless steel beam without the carbon fiber was performed. Subsequently, modal analyses of stainless steel beam were performed with three different types of carbon fiber that are bonded to the beam with an appropriate resin. It was then possible to obtain the first three experimental frequencies for each case. Finally, with the finite element model validated for the stainless beam, the three models were developed, which include in the validated analysis the compound: resin and carbon fiber, for the three cases studied. It was then possible to adjust the values of the elastic modulus, Poisson's ratio and the density of the composite material, the carbon fibers with the resin. The methodology has brought accurate results, allowing the development of projects using these composite materials with mechanical properties obtained experimentally.

Keywords: Identification of Composite Materials Properties, Modal analysis and Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

| Figura 2.1 - Esquema da bancada experimental para realização da análise modal16 |
|---|
| Figura 2.2 – Foto da Bancada Experimental16 |
| Figura 2.3 – Posicionamento do sensor LVDT17 |
| Figura 2.4 – Sinal da Força Impulsiva e do Deslocamento da Viga de Aço Inoxidável |
| no Domínio do Tempo18 |
| Figura 2.5 – Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz |
| detalhando a identificação da frequência de 8,75 Hz19 |
| Figura 2.6 – Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz |
| detalhando a identificação da frequência de 55,5 Hz19 |
| Figura 2.7 – Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 200 Hz |
| detalhando a identificação da frequência de 154 Hz20 |
| Figura 2.8 – Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz |
| detalhando a identificação da frequência de 60 Hz21 |
| Figura 2.9 – Função de Coerência da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz |
| detalhando baixa Coerência na frequência de 60 Hz23 |
| Figura 2.10 – Modelo em elementos finitos da viga de aço inoxidável23 |
| Figura 2.11 – Detalhamento do modelo em elementos finitos demonstrando a malha |
| estruturada24 |
| Figura 2.12 – Condições de contorno de deslocamento nulo em todas as direções no |
| engastamento25 |
| Figura 2.13 - Frequências obtidas em simulação computacional de viga de aço |
| inoxidável26 |
| Figura 3.1 - Colagem das fibras de carbono ao aço inoxidável por bomba de |
| vácuo28 |
| Figura 3.2 – Viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono unidirecional28 |
| Figura 3.4 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono |
| unidirecional na banda de 0 a 100 Hz detalhando a identificação da frequência de |
| 40,25 Hz |
| Figura 3.5 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono |
| unidirecional na banda de 0 a 200 Hz detalhando a identificação da frequência de |
| 114 Hz29 |

Figura 3.7 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono bidirecional na banda de 0 a 50 Hz detalhando a identificação da frequência de Figura 3.8 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono bidirecional na banda de 0 a 200 Hz detalhando a identificação da frequência de Figura 3.10 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono aramida da marca Kevlar na banda de 0 a 50 Hz detalhando a identificação da frequência de 5,625 Hz......32 Figura 3.11 - Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono aramida da marca Kevlar na banda de 0 a 50 Hz detalhando a identificação da Figura 3.12 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono aramida da marca Kevlar na banda de 0 a 100 Hz detalhando a identificação da Figura 3.13 - Detalhamento do modelo em elementos finitos demonstrando a malha estruturada de uma viga com dois materiais......34 Figura 3.14 – Condições de contorno de deslocamento nulo em todas as direções no engastamento da viga de dois materiais......34 Figura 3.15 – Medições da massa e comprimentos para obtenção das densidades das fibras de carbono utilizadas......35 Figura 3.16 – Frequências obtidas em simulação computacional de viga de aço Figura 3.17 – Frequências obtidas em simulação computacional de viga de aço Figura 3.18 – Frequências obtidas em simulação computacional de viga de aço Figura 3.19 – Modos de vibrar correspondentes aos testados, todos com deformação Figura 3.20 – Modo de vibrar obtido na 3ª frequência da simulação computacional da viga de aco inoxidável com a fibra de carbono unidirecional, com deformação em y......38

| Figura 5.1 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbo | ono |
|--|-----|
| unidirecional na banda de 0 a 20 Hz detalhando a identificação da frequência | de |
| 6,300 Hz | .42 |
| Figura 7.1 – Martelo de impacto e Transdutor de força | .45 |
| Figura 7.2 – Sensor LVDT e condicionador de sinais | .46 |
| Figura 7.3 – Analisador de espectro | 46 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela 2.1 – Comparação dos resultados entre o experimento e o erro |
|--|
| encontrado25 |
| Tabela 3.1 – Características dimensionais das vigas com fibra de carbono27 |
| Tabela 3.2 - Características dimensionais e de malha das três vigas contendo fibra |
| de carbono, além da densidade de cada fibra36 |
| Tabela 4.1 – Propriedades identificadas das três fibras de carbono |
| Tabela 4.2 – Frequencias experimentais e computacionais e diferença percentual da |
| viga composta por aço inoxidável e fibra de carbono unidirecional |
| Tabela 4.3 – Frequências experimentais e computacionais e diferença percentual da |
| viga composta por aço inoxidável e fibra de carbono bidirecional40 |
| Tabela 4.4 – Frequências experimentais e computacionais e diferença percentual da |
| viga composta por aço inoxidável e fibra de carbono aramida da marca Kevlar40 |
| Tabela 5.1 - Frequências experimentais e computacionais do primeiro modo de |
| vibrar e diferença percentual da viga composta por aço inoxidável e fibra de carbono |
| unidirecional em duas bandas42 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| [C] | Matriz de amortecimento estrutural | | | |
|--------------|---|--|--|--|
| E | Módulo de elasticidade | | | |
| Ex | Módulo de elasticidade em x | | | |
| Ey | Módulo de elasticidade em y | | | |
| Ez | Módulo de elasticidade em z | | | |
| F1-bi | Frequência obtida do primeiro modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| | de carbono bidirecional | | | |
| F2-bi | Frequência obtida do segundo modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| | de carbono bidirecional | | | |
| F3-bi | Frequência obtida do terceiro modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| | de carbono bidirecional | | | |
| F1-inox | Frequência obtida do primeiro modo de vibrar da viga de aço | | | |
| | inoxidável | | | |
| F2-inox | Frequência obtida do segundo modo de vibrar da viga de aço | | | |
| | inoxidável | | | |
| F3-inox | Frequência obtida do terceiro modo de vibrar da viga de aço | | | |
| | inoxidável | | | |
| F1-kev | Frequência obtida do primeiro modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| | de carbono aramida da marca Kevlar | | | |
| F2-kev | Frequência obtida do segundo modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| | de carbono aramida da marca Kevlar | | | |
| F3-kev | Frequência obtida do terceiro modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| | de carbono aramida da marca Kevlar | | | |
| F1-uni | Frequência obtida do primeiro modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| | de carbono unidirecional | | | |
| F1'-uni | Frequencia obtida do primeiro modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| F o · | de carbono unidirecional – em segundo teste | | | |
| F2-uni | Frequencia obtida do segundo modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| Fo! | de carbono unidirecional | | | |
| F3-UNI | Frequencia obtida do terceiro modo de vibrar da viga contendo fibra | | | |
| ^ | de carbono unidirecional Médulo de electicidade terrienal | | | |
| G | Módulo de elasticidade torcional | | | |
| GXY | Módulo de elasticidade torcional no plano xy | | | |
| GXZ | Módulo de elasticidade torcional no plano xz | | | |
| Gyz | Modulo de elasticidade torcional no piano yz | | | |
| | Matriz de norese estrutural | | | |
| [///] (ä) | Vetor de aceleração podal | | | |
| { 4 } | Veter de velocidade nodal | | | |
| { 4 } | Veter de declecemente nodel | | | |
| { 4 } | Velor de desidualmento nodal Donsidado | | | |
| v | Densiudue Casticiante de Deisson | | | |
| ρ | | | | |

SUMÁRIO

| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
|---|----|
| | |
| 2 ANALISE MODAL DA VIGA DE AÇO INOXIDAVEL E A VALIDAÇAO | |
| DE SEU MODELO EM ELEMENTOS FINITOS | 15 |
| 2.1 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL DA VIGA DE AÇO INOXIDÁVEL | 15 |
| 2.2 VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZANDO UM MODELO EM | |
| ELEMENTOS FINITOS | 22 |
| 2.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ANÁLISE | |
| MODAL E COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS | 24 |
| | |
| 3 ANÁLISE MODAL DA VIGA DE AÇO INOXIDÁVEL COM AS FIBRAS | |
| DE CARBONO E A UTILIZAÇÃO DE SEU MODELO NUMÉRICO PARA | |
| IDENTIFICAR SUAS PROPRIEDADES | 26 |
| 3.1 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE CADA UMA DAS | |
| TRÊS FIBRAS DE CARBONO COLADAS AO AÇO INOXIDÁVEL | 26 |
| 3.1.1 Frequências obtidas experimentalmente com a viga contendo | |
| Fibra de carbono unidirecional | 28 |
| 3.1.2 Frequências obtidas experimentalmente com a viga contendo | |
| Fibra de carbono bidirecional | 30 |
| 3.1.3 Frequências obtidas experimentalmente com a viga contendo | |
| Fibra de carbono aramida da marca Kevlar | 31 |
| 3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS VIGAS CONTENDO FIBRA DE | |
| CARBONO | 33 |
| | |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| | |
| 5 CONCLUSÃO | 41 |
| A | |
| 6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 43 |
| | 45 |
| | 45 |
| 7.1 INSTRUMENTAÇAO UTILIZADA | 45 |

| 7.1.1 Martelo de impacto e Transdutor de força | 45 |
|---|----|
| 7.1.2 Sensor LVDT e seu condicionador de sinais | 46 |
| 7.1.3 Analizador de espectro | 46 |
| 7.2 BLOCK LANCZOS (BLOCO DE LANCZOS) | 47 |

1 INTRODUÇÃO

Muitos equipamentos da indústria automobilística, aeronáutica e aeroespacial utilizam placas reforçadas com fibras de carbono devido à sua alta resistência mecânicas e seu baixo peso específico, assim como muitos outros campos de indústrias que utilizam essa tecnologia moderna.

As características mecânicas, tais como as constantes elásticas, fatores de amortecimento, frequências naturais e modos de vibrar de estruturas, são difíceis de identificar, devido ao fato dessas estruturas sintéticas serem fabricadas por diferentes métodos ou processos de cura que podem gerar diferentes propriedades mecânicas e estas são influenciadas, pois a fibra de carbono normalmente é composta por várias camadas coladas com adesivo epóxi.

Ao final do século XX, a determinação das propriedades mecânicas desses materiais compósitos tornou-se um importante tópico de pesquisa, e diferentes técnicas para identificação dessas propriedades têm sido propostas, utilizando-se vigas ou placas.

Castagnéde *et al.* (1990) determinou as constantes elásticas de placas com fibra de carbono por meio de uma abordagem quantitativa de ultrassons. Fallstrom e Jonsson (1991) determinaram as propriedades mecânicas de materiais de placas anisotrópicos, utilizando as frequências e modos de vibração medidos por um sistema de holografia em tempo real.

Nielsenand e Toftegaard (1998) usaram a abordagem de medição ultrassônica para obtenção das constantes elásticas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono sob a influência da umidade absorvida.

Berman e Nagy (1983) utilizaram as frequências naturais e os modos de vibração para melhorar um modelo analítico de matrizes de massa e rigidez de uma estrutura.

Kam (1992, 1994a, 1994b, 1998, 2000 e 2001) desenvolveu métodos para identificar a rigidez de flexão das estruturas usando as frequências naturais e os modos de vibração medidos; e para determinar as constantes elásticas, devido ao cisalhamento de placas laminadas compostas por fibras de carbono. Utilizou deslocamentos obtidos a partir de ensaios das placas. Moussu e Nivoit (1988) utilizaram o método da superposição para determinar as constantes elásticas de placas retangulares livres a partir das frequências naturais experimentais medidas das placas.

Wilde e Sol (1987) utilizaram o método de estimação bayesiana para o estudo da identificação das constantes elásticas a partir das frequências naturais experimentais de placas compostas retangulares livres.

Araujo *et al.* (1996 e 2002) utilizaram um método de otimização para determinar as constantes elásticas de placas compósitas livres utilizando as frequências naturais medidas nas placas.

Em geral, os métodos propostos nesta revisão bibliográfica são aplicáveis apenas para placas com condições de contorno simples e podem requerer o uso de 12 a 16 frequências naturais no processo de identificação para obter resultados com precisão satisfatória.

Portanto, se as propriedades mecânicas realistas da placa devem ser determinadas de forma não destrutiva, os efeitos do engaste nas análises de identificação devem ser considerados. Embora o sistema de identificação de placas engastadas seja um tema importante de pesquisa, até agora não há muito trabalho dedicado a esta área.

Neste trabalho, propõe-se uma metodologia de ensaio não destrutivo baseado na análise modal para a identificação de propriedades mecânicas de três diferentes tipos de fibras de carbono, sendo ensaiadas em forma de vigas juntamente com o adesivo epóxi e aço inoxidável. Para tanto, o método dos elementos finitos é utilizado fazendo-se ajustes e validações dos modelos propostos para os compósitos pesquisados, que serão uma contribuição para a equipe AERO-VITÓRIA que necessita desses dados visando otimização do peso e resistência mecânica de vários subsistemas do aeromodelo a ser desenvolvido em futuras competições.

Desta forma, os objetivos desse trabalho são:

 Realizar análise modal de uma viga de aço inoxidável e, com um modelo em elementos finitos, ajustar e validar os resultados obtidos experimentalmente;

- Realizar análise modal de três vigas de aço inoxidável, cada uma com um tipo diferente de fibra de carbono colada com adesivo epóxi;
- Com base no modelo validado experimental e computacionalmente, ajustar modelos em elementos finitos para corresponder com os resultados obtidos experimentalmente com os três diferentes tipos de fibra de carbono;
- Finalmente, apresentar as propriedades mecânicas dessas fibras de carbono coladas com adesivo epóxi, tais como: Módulos de Elasticidade Ex, Ey e Ez; Módulos de Elasticidade Torcional Gxy, Gxz e Gyz e os Coeficientes de Poisson.

Diante dos objetivos propostos, esse projeto de graduação está assim organizado:

- No Capítulo 2 é realizada a análise modal de uma viga de aço inoxidável, sua validação computacional utilizando o método dos elementos finitos e os resultados obtidos são comparados;
- No Capítulo 3 é realizada a análise modal de cada viga de aço inoxidável com as fibras, sua validação computacional utilizando modelos desenvolvidos pelo método dos elementos finitos e os resultados são comparados;
- ✓ No Capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões;
- ✓ No Capítulo 5 é apresentada a conclusão;
- ✓ No Capítulo 6 são listadas as referências bibliográficas;
- ✓ No Capítulo 7, o Apêndice.

2 ANÁLISE MODAL DA VIGA DE AÇO INOXIDÁVEL E A VALIDAÇÃO DE SEU MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Nesse capítulo é feita a descrição do ensaio da análise modal de uma viga de aço inoxidável, de medidas 300 x 30 x 1 mm, com intuito de identificar suas três primeiras frequências naturais. O experimento é descrito e os resultados obtidos apresentados. Assim, é desenvolvido um modelo em elementos finitos para a análise modal computacional. Esse modelo computacional é validado tal como será mostrado na comparação dos resultados obtidos no final desse capítulo.

2.1 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL DA VIGA DE AÇO INOXIDÁVEL

A análise modal é um procedimento experimental no qual é possível descrever as propriedades dinâmicas de uma estrutura, tais como as frequências naturais, os fatores de amortecimentos e os modos de vibrações.

A partir de dados adquiridos experimentalmente no domínio do tempo, é possível transformá-los para domínio da frequência utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT: *Fast Fourier Tranform*), para obter a Função de Resposta em Frequência (FRF). A FRF é denominada de receptância quando se mede o deslocamento como saída do sistema, mobilidade quando na saída é medida a velocidade e acelerância quando se mede a aceleração.

Para o ensaio em questão, monta-se um experimento, conforme mostra a Figura 2.1, numa mesa inercial (7), como de praxe em experimentos de vibrações. Essa mesa atua como um filtro físico, para que excitações externas não influenciem no experimento. No desenho esquemático da bancada é apresentada a viga de aço inoxidável (1) em balanço (engastada em uma das extremidades e livre na outra), que é fixa numa estrutura muito rígida e de alta frequência para que não influencie nas frequências a serem identificadas. Na viga, é colocado um sensor de deslocamento LVDT (2 - LVDT: *Linear Variable Differential Transformer*) a uma distância apropriada segundo o fabricante.

A viga é excitada com uma força impulsiva transiente através de um martelo de impacto (3), que possui um transdutor de força. Tanto o sensor de deslocamento como o de força possuem seus respectivos condicionadores de sinais (5 e 4). Após o condicionamento dos sinais, estes são entradas para o Analisador de Espectro (6) – (*CF-350 Portable Dual Channel FFT Analyzer*) para que se possa obter a Receptância.



Figura 2.1 - Esquema da bancada experimental para realização da análise modal



Figura 2.2 - Foto da Bancada Experimental

Figura 2.2 apresenta uma foto da bancada experimental para realização da análise modal, onde toda instrumentação é mostrada, conforme já descrito seus componentes com os mesmos números da Figura 2.1.



Figura 2.3 – Posicionamento do sensor LVDT

A Figura 2.3 mostra a bancada (à direita). O sensor de deslocamento é de natureza eletromagnética e é necessário ficar uma distância de 2 mm do ponto de medição, como pode ser visto na foto (à esquerda), seu posicionamento em relação à viga.

A Figura 2.4 é uma foto do Analisador de Espectro que mostra, no domínio do tempo, o sinal do impacto (parte inferior), isto é, a força impulsiva de excitação e o deslocamento medido (parte superior).

É utilizado um gatilho (*trigger*) externo da força impulsiva, que é uma função específica do Analisador de Espectro tal que utiliza somente um pequeno trecho dos sinais, no caso com um tempo de aproximadamente 0,4 segundos, para o cálculo das FRF's.



Figura 2.4 – Sinal da Força Impulsiva e do Deslocamento da Viga de Aço Inoxidável no Domínio do Tempo

Nas Figuras 2.5 e 2.6, é possível identificar duas frequências na banda de 0 a 100 Hz, respectivamente, 8,75 Hz e 55,5 Hz. Já na Figura 2.7, identifica-se a frequência de 154 Hz na banda de 0 a 200 Hz.

Todas essas FRF's são obtidas fazendo 32 médias e utilizando uma janela retangular. As médias são necessárias para que o sinal traga confiabilidade. É mostrado, adiante, o gráfico da função de coerência que traduz se o sinal de deslocamento medido é devido à força impulsiva aplicada na viga de aço inoxidável.



Figura 2.5 – Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz detalhando a identificação da frequência de 8,75 Hz



Figura 2.6 – Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz detalhando a identificação da frequência de 55,5 Hz



Figura 2.7 – Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 200 Hz detalhando a identificação da frequência de 154 Hz

A Figura 2.8 mostra a Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz detalhando a frequência de 60 Hz. Pode ser visto, também, na Figura 2.7, na banda de 0 a 200 Hz os harmônicos de 60 Hz que são as frequências de 120 Hz e 180 Hz.

A Figura 2.9 comprova, na Função Coerência, que a frequência de 60 Hz apresenta baixo valor, isto é, ela não é devida à força impulsiva, e sim, devido à frequência da rede elétrica, assim como as frequências de 120 Hz e 180 Hz.

Apesar de o laboratório ser aterrado, tem-se o cuidado de usar um ponto de terra em todos os equipamentos ligados à rede para evitar laço de rede.



Figura 2.8 – Receptância da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz detalhando a identificação da frequência de 60 Hz



Figura 2.9 – Função de Coerência da viga de aço inoxidável na banda de 0 a 100 Hz detalhando baixa Coerência na frequência de 60 Hz

2.2 VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZANDO UM MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Existem diversos métodos numéricos para resolver as equações apresentadas abaixo, como, por exemplo, o método das diferenças finitas centradas, o método de volumes finitos e, dentre outros códigos numéricos, o método dos elementos finitos, que é o método utilizado na análise modal computacional proposta. O código é gerado com o programa ANSYS[®] 14.0.

O método dos elementos finitos é uma técnica largamente utilizada por pesquisadores e engenheiros na solução de problemas complexos, onde não é possível a obtenção analítica da solução da equação diferencial que descreve o problema.

A equação governante da estrutura da viga de aço inoxidável é a equação 4.1.

$$[M]{\ddot{q}} + [C]{\dot{q}} + [K]{q} = {F}$$
(4.1)

onde [M] é a matriz de massa estrutural, [C]é a matriz de amortecimento estrutural, [K] é a matriz de rigidez estrutural, $\{\ddot{q}\}$ é o vetor de aceleração nodal, $\{\dot{q}\}$ é o vetor de velocidade nodal e $\{q\}$ é o vetor de deslocamento nodal. Para solução da análise modal, utiliza-se o algoritmo de extração dos modos de vibrações de *Block Lanczos*, que será brevemente descrito no Apêndice 7.2 e pode ser encontrado com um maior detalhamento em Grimes *et al* (1994). Furtado (2006) e Marques (1991) também descreveram este método.

Assim, é necessária a discretização das equações matemáticas que regem o modelo físico para obtenção do modelo em elementos finitos. Com a discretização dessas equações, o modelo matemático do sistema passa a ser representado por um conjunto de equações diferenciais, expressas na forma matricial.

O modelo da viga de aço inoxidável é discretizado em elementos finitos denominados por SOLID 45 (ANSYS) - 3D, que são paralelepípedos onde cada um dos oito nós desses elementos possuem os seguintes graus de liberdade: deslocamentos nas direções x, y e z, e com hipótese de incompressibilidade. O modelo desenvolvido em elementos finitos tem uma malha estruturada.

A malha é composta por 9000 elementos equivalente a 18.662 nós, uma vez que nessa configuração, as convergências das soluções são preservadas em relação a uma malha com mais elementos e diferentes refinamentos.

Na Figura 2.10 é exposto o modelo em elementos finitos da estrutura da viga de aço inoxidável e na Figura 2.11 é mostrado o detalhamento da malha estruturada.





Figura 2.10 – Modelo em elementos finitos da viga de aço inoxidável

Figura 2.11 - Detalhamento do modelo em elementos finitos demonstrando a malha estruturada

A Figura 2.12 exibe a condição de contorno, qual seja: o engastamento da viga de aço inoxidável, onde os componentes dos elementos possuem deslocamentos nulos em x, y e z.



Figura 2.12 - Condições de contorno de deslocamento nulo em todas as direções no engastamento

2.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ANÁLISE MODAL E COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Em simulação, as frequências são obtidas numericamente, considerando-se para o aço inoxidável o Coeficiente de Poisson no plano xy de 0,25, Módulo de Elasticidade em x de 1,19 GPa e densidade de 7.860 Kg/m³. Essas frequências são mostradas na Figura 2.13.

A Tabela 2.1 indica os resultados experimentais (conforme Figuras 2.5, 2.6 e 2.7) comparando-os com os computacionais (em FEM – *Finite Element Method*), obtendo-se o erro em relação ao resultado experimental.

| ***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE ***** | | | | | | |
|--|--------------------|------------------|--------------|-----------------|--|--|
| SET 1 | TIME/ERE 8.9359 | Q LOAD STEP 1 | SUBSTEP 1 | CUMULATIVE 1 | | |
| 2 | 55.988 | 1 | 2 | 2 | | |
| 3 | 156.85 | 1 | 3 | 3 | | |
| 4 | 177.09 | 1 | 4 | 4 | | |
| 5 | 265.07 | 1 | 5 | 5 | | |

Figura 2.13 – Frequências obtidas em simulação computacional de viga de aço inoxidável

| FREQUÊNCIAS | EXPERIMENTO | ANSYS | ERRO |
|----------------|-------------|--------|-------|
| F1-inox [Hz] | 8,75 | 8,94 | 2,12% |
| F2-inox [Hz] | 55,50 | 55,99 | 0,88% |
| F3-inox [Hz] | 154,00 | 156,85 | 1,85% |

Tabela 2.1 - Comparação dos resultados entre o experimento e o erro encontrado

Com os resultados, observa-se que o modelo em elementos finitos foi validado, uma vez que o máximo erro relativo obtido foi de 2,12 %. Na análise do erro é importante observar que o valor máximo encontrado ocorreu numa frequência de menor magnitude, onde a diferença foi de apenas 0,19 Hz. Além disso, a resolução do analisador na banda utilizada é de 0,25 Hz. Com um teste utilizando melhor resolução, é provável que o valor experimental se aproxime ainda mais do FEM.

3 ANÁLISE MODAL DA VIGA DE AÇO INOXIDÁVEL COM AS FIBRAS DE CARBONO E A UTILIZAÇÃO DE SEU MODELO NUMÉRICO PARA IDENTIFICAR SUAS PROPRIEDADES

Nesse capítulo, é feita a descrição dos ensaios das análises modais das vigas de aço inoxidável coladas com resina epóxi a cada fibra de carbono. As mesmas etapas do teste do aço inoxidável são repetidas, porém, como as propriedades das fibras não são conhecidas previamente, elas são ajustadas nas simulações, uma vez validado o FEM, com o intuito de identificar suas propriedades mecânicas. O experimento é descrito neste capítulo e será apresentada a comparação dos resultados obtidos no Capítulo 4.

3.1 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE CADA UMA DAS TRÊS FIBRAS DE CARBONO COLADAS AO AÇO INOXIDÁVEL

Antes dos ensaios é feita a colagem de cada fibra ao aço inoxidável com resina epóxi e a cura por meio de bomba de vácuo, como mostra a Figura 3.1.



Figura 3.1 – Colagem das fibras de carbono ao aço inoxidável por bomba de vácuo

Para esses ensaios, montam-se os experimentos conforme foi mostrado na Figura 2.1, da mesma maneira que foi feito com a viga somente de aço inoxidável, numa mesa inercial, vigas em balanço fixas numa estrutura muito rígida e de alta frequência, com um sensor de deslocamento LVDT a uma distância apropriada. As vigas são excitadas com o martelo de impacto, que possui um transdutor de força e utiliza um gatilho externo. Após o condicionamento dos sinais, tanto do martelo quanto do sensor, estes são entradas para o Analisador de Espectro para que se possa obter a Receptância. As FRF's são obtidas fazendo 32 médias e utilizando uma janela retangular. Apesar de o laboratório ser aterrado, tem-se o cuidado de usar um ponto de terra em todos os equipamentos ligados à rede para evitar laço de rede.

Na Tabela 3.1 são explicitadas as características de cada viga, a saber, compostas pelas fibras de carbono unidirecional, bidirecional e aramida da marca Kevlar.

| | Unidirecional | Bidirecional | Kevlar |
|----------------------------|---------------|--------------|--------|
| Comprimento [mm] | 450 | 370 | 450 |
| Largura [mm] | 24,7 | 32,0 | 29,6 |
| Espessura total [mm] | 1,75 | 2,00 | 2,15 |
| Espessura da fibra [mm] | 0,65 | 1,00 | 0,75 |

Tabela 3.1 – Características dimensionais das vigas com fibra de carbono

3.1.1 FREQUÊNCIAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM A VIGA CONTENDO FIBRA DE CARBONO UNIDIRECIONAL

A Figura 3.2 retrata a viga de aço inoxidável com fibra de carbono unidirecional utilizada nos ensaios.



Figura 3.2 – Viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono unidirecional

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram a identificação de duas frequências na banda de 0 a 100 Hz, respectivamente, 6,5 Hz e 40,25 Hz. Já a Figura 3.5 apresenta a identificação da frequência de 114 Hz na banda de 0 a 200 Hz.

Não estão detalhadas, nessas figuras, as frequências devidas à rede, mas é possível perceber, novamente, a frequência de 60 Hz e seus harmônicos: 120 Hz e 180 Hz.



Figura 3.3 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono unidirecional na banda de 0 a 100 Hz detalhando a identificação da frequência de 6,5 Hz



Figura 3.4 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono unidirecional na banda de 0 a 100 Hz detalhando a identificação da frequência de 40,25 Hz



Figura 3.5 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono unidirecional na banda de 0 a 200 Hz detalhando a identificação da frequência de 114 Hz

3.1.2 FREQUÊNCIAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM A VIGA CONTENDO FIBRA DE CARBONO BIDIRECIONAL

A Figura 3.6 retrata a viga de aço inoxidável com fibra de carbono bidirecional utilizada nos ensaios.



Figura 3.6 – Viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono bidirecional

A Figura 3.7 expõe a identificação da frequência de 9,125 Hz na banda de 0 a 50 Hz e a Figura 3.8 destaca a identificação da frequência de 159 Hz na banda de 0 a 200 Hz. Não é apresentada uma terceira frequência, pois se acredita que um dos modos de vibrar tem o seu valor próximo a 60 Hz, porém isso não foi percebido durante os ensaios.

Novamente, não estão detalhadas, nessas figuras, as frequências devidas à rede, mas é possível perceber a frequência de 60, 120 e 180 Hz na Figura 3.8.



Figura 3.7 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono bidirecional na banda de 0 a 50 Hz detalhando a identificação da frequência de 9,125 Hz



Figura 3.8 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono bidirecional na banda de 0 a 200 Hz detalhando a identificação da frequência de 159 Hz

Para saber se realmente essa frequência próxima a 60 Hz é relativa ao segundo modo de vibrar da viga, seria necessário analisar a função coerência, porém ela não foi analisada.

Outra solução seria repetir o teste, engastando a viga em um comprimento diferente, por exemplo, 300 mm (anteriormente estava em 370 mm).

3.1.3 FREQUÊNCIAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM A VIGA CONTENDO FIBRA DE CARBONO ARAMIDA DA MARCA KEVLAR

A Figura 3.9 retrata a viga de aço inoxidável com fibra de carbono aramida da marca Kevlar utilizada nos ensaios.



Figura 3.9 - Viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono bidirecional

As Figuras 3.10 e 3.11 exibem a identificação de duas frequências na banda de 0 a 50 Hz, de 5,625 Hz e 35,5 Hz, respectivamente, e a Figura 3.12 apresenta a frequência de 98,75 Hz na banda de 0 a 100 Hz.

Novamente, não estão detalhadas, nessas figuras, as frequências devidas à rede, mas é possível perceber a frequência de 60 Hz na Figura 3.12.



Figura 3.10 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono aramida da marca Kevlar na banda de 0 a 50 Hz detalhando a identificação da frequência de 5,625 Hz



Figura 3.11 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono aramida da marca Kevlar na banda de 0 a 50 Hz detalhando a identificação da frequência de 35,5 Hz



Figura 3.12 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono aramida da marca Kevlar na banda de 0 a 100 Hz detalhando a identificação da frequência de 98,75 Hz

3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS VIGAS CONTENDO FIBRA DE CARBONO

Novamente, o método dos elementos finitos é utilizado na análise modal computacional proposta. O código é gerado com o programa ANSYS[®] 14.0. Para solução da análise modal, utiliza-se o mesmo algoritmo de extração dos modos de vibrações que o da viga de aço inoxidável, conforme visto no Capítulo 2.

Como cada viga é composta por dois materiais, a discretização dos modelos é feita em dois tipos de elementos finitos diferentes, são eles: parte de aço inoxidável é representada pelo SOLID 45 (ANSYS) - 3D, como feito anteriormente; e parte da fibra é representada pelo SOLID 185 (ANSYS) - 3D que também são paralelepípedos onde cada um dos oito nós desses elementos possuem os seguintes graus de liberdade: deslocamentos nas direções x, y e z, e com hipótese de quase incompressibilidade.

Na Figura 3.13 é apresentado o detalhamento da malha estruturada da viga de aço inoxidável com fibra de carbono. A Figura 3.14 representa a condição de contorno, qual seja: o engastamento da viga de dois materiais, onde os componentes dos elementos possuem deslocamentos nulos em x, y e z.



Figura 3.13 - Detalhamento do modelo em elementos finitos demonstrando a malha estruturada de uma viga com dois materiais



Figura 3.14 – Condições de contorno de deslocamento nulo em todas as direções no engastamento da viga de dois materiais

A solução pelo método dos elementos finitos necessita, como dados de entrada, as características da fibra testada: densidade (ρ), módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (v) e módulo de elasticidade torcional (G). O coeficiente de Poisson foi considerado 0,3 para todas as fibras. Para cálculo da densidade, primeiramente as massas das vigas de aço inoxidável foram medidas e depois foram medidas as massas das vigas com aço inoxidável com suas diferentes fibras, como mostra a Figura 3.15. Para obtenção do volume as medidas de comprimento de fibra, espessura e largura foram medidas com um paquímetro, para as três vigas. As características de cada uma estão relacionadas na Tabela 3.2.



Figura 3.15 – Medições da massa e comprimentos para obtenção das densidades das fibras de carbono utilizadas

Uma vez conhecidas as frequências experimentais, os modelos são simulados, inicialmente com valores arbitrários para suas propriedades mecânicas. Posteriormente, essas propriedades são ajustadas a cada simulação de maneira a aproximar às frequências teóricas das experimentais. Os valores das propriedades identificados são aqueles que resultam num valor mais aproximado das três frequências naturais de cada viga com suas diferentes fibras de carbono.

| | Unidirecional | Bidirecional | Kevlar |
|---|---------------|--------------|--------|
| Comprimento [mm] | 450 | 370 | 450 |
| Largura [mm] | 24,7 | 32,0 | 29,6 |
| Espessura total [mm] | 1,75 | 2,00 | 2,18 |
| Espessura da fibra [mm] | 0,65 | 1,00 | 0,75 |
| Número de nós da malha [mm] | 35.178 | 36.729 | 41.943 |
| Número de elementos da malha [mm] | 22.500 | 23.680 | 27.000 |
| Densidade [Kg/m³] | 1.209,4 | 929,1 | 888,5 |

Tabela 3.2 – Características dimensionais e de malha das três vigas contendo fibra de carbono, além da densidade de cada fibra

Na Figura 3.16 são mostradas as três primeiras frequências obtidas computacionalmente da viga contendo fibra de carbono unidirecional. Na Figura 3.17, as frequências da viga contendo fibra de carbono bidirecional e na Figura 3.18, as frequências da aramida da marca Kevlar.



Figura 3.16 – Frequências obtidas em simulação computacional de viga de aço inoxidável com a fibra de carbono unidirecional

| yok | ***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE ****** | | | | | |
|-----|---|-------------------|-------------------|--------------|-----------------|--|
| ę | FT 1 | TIME/ER 9.2201 | eq load step 1 | SUBSTEP 1 | CUMULATIVE 1 | |
| | 2 | 57.770 | 1 | 2 | 2 | |
| | 3 | 161.79 | 1 | 3 | 3 | |
| | 4 | 189.27 | 1 | 4 | 4 | |
| | 5 | 199.50 | 1 | 5 | 5 | |

Figura 3.17 – Frequências obtidas em simulação computacional de viga de aço inoxidável com a fibra de carbono bidirecional

| * | ***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE ****** | | | | | |
|---|---|--------------------|------------------|--------------|-----------------|--|
| | SET 1 | TIME/EPE 5.6578 | Q LOAD STEP 1 | SUBSTEP 1 | CUHULATIVE 1 | |
| | 2 | 35.453 | 1 | 2 | 2 | |
| | 3 | 99.287 | 1 | 3 | 3 | |
| | 4 | 114.10 | 1 | 4 | 4 | |
| | 5 | 166.93 | 1 | 5 | 5 | |

Figura 3.18 – Frequências obtidas em simulação computacional de viga de aço inoxidável com a fibra de carbono aramida da marca Kevlar

Nota-se que, na Figura 3.16 foi descartada uma frequência. Isso se deve pelo fato de que essa frequência não pertence aos modos de vibração obtidos na análise modal. Os modos esperados são os três retratados na Figura 3.19. A vibração descartada é exibida na Figura 3.20.



Figura 3.19 - Modos de vibrar correspondentes aos testados, todos com deformação apenas em x



Figura 3.20 – Modo de vibrar obtido na 3ª frequência da simulação computacional da viga de aço inoxidável com a fibra de carbono unidirecional, com deformação em y

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

| | Unidirecional | Bidirecional | Kevlar |
|-------------|---------------|--------------|--------|
| Ex [Gpa] | 35,0 | 15,0 | 2,5 |
| Ey [Gpa] | 35,0 | 15,0 | 2,5 |
| Ez [Gpa] | 70,0 | 30,0 | 5,0 |
| Gxy [Gpa] | 7,0 | 3,0 | 0,5 |
| Gxz [Gpa] | 23,3 | 10,0 | 1,7 |
| Gyz [Gpa] | 23,3 | 10,0 | 1,7 |
| ν | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| ρ [Kg/m³] | 1209,4 | 929,1 | 888,5 |

Os resultados obtidos neste trabalho são expostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades identificadas das três fibras de carbono

As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 exibem as frequências identificadas experimentalmente com as computacionais das vigas com fibra unidirecional, bidirecional e aramida da marca Kevlar, respectivamente, bem como as diferenças percentuais e as bandas utilizadas na extração de cada frequência. Esses valores são para demonstrar confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 4.2 - Frequências experimentais e computacionais e diferença percentual da viga composta por aço inoxidável e fibra de carbono unidirecional

| FREQUÊNCIAS | EXPERIMENTO | ANSYS | ERRO | BANDA |
|-----------------|-------------|--------|-------|------------|
| F1 – uni [Hz] | 6,50 | 6,53 | 0,40% | 0 - 100 Hz |
| F2 – uni [Hz] | 40,25 | 40,90 | 1,61% | 0 - 100 Hz |
| F3 – uni [Hz] | 114,00 | 114,52 | 0,46% | 0 - 200 Hz |

Tabela 4.3 – Frequências experimentais e computacionais e diferença percentual da viga composta por aço inoxidável e fibra de carbono bidirecional

| FREQUÊNCIAS | EXPERIMENTO | ANSYS | ERRO | BANDA |
|--------------|-----------------|--------|-------|------------|
| F1-bi [Hz] | 9,13 | 9,22 | 1,04% | 0 a 50 Hz |
| F2-bi [Hz] | Próxima a 60 Hz | 57,77 | ? | 0 a 200 Hz |
| F3-bi [Hz] | 159,00 | 161,79 | 1,75% | 0 a 200 Hz |

Tabela 4.4 – Frequências experimentais e computacionais e diferença percentual da viga composta por aço inoxidável e fibra de carbono aramida da marca Kevlar

| FREQUÊNCIAS | EXPERIMENTO | ANSYS | ERRO | BANDA |
|---------------|-------------|-------|--------|------------|
| F1-kev [Hz] | 5,63 | 5,66 | 0,58% | 0 a 50 Hz |
| F2-kev [Hz] | 35,50 | 35,45 | -0,13% | 0 a 50 Hz |
| F3-kev [Hz] | 98,75 | 99,29 | 0,54% | 0 a 100 Hz |

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposta uma metodologia de ensaio não destrutivo baseado na análise modal para a identificação de propriedades mecânicas de três diferentes tipos de fibras de carbono, sendo ensaiadas em forma de vigas engastadas, juntamente com o adesivo epóxi e aço inoxidável. Para tanto, o método dos elementos finitos foi utilizado fazendo-se ajustes e validações dos modelos propostos para os compósitos pesquisados, que são uma contribuição para a equipe AERO-VITÓRIA que necessita desses dados visando otimização do peso e resistência mecânica de vários subsistemas do aeromodelo a ser desenvolvido em futuras competições.

Desta forma:

- Realizou-se a análise modal de uma viga de aço inoxidável e, com um modelo em elementos finitos, ajustaram-se e validaram-se os resultados obtidos experimentalmente;
- Foram realizadas análises modais de três vigas de aço inoxidável, cada uma com um tipo diferente de fibra de carbono colada com adesivo epóxi;
- Com base no modelo em elementos finitos da viga de aço inoxidável validado em relação aos resultados da análise modal, ajustaram-se modelos em elementos finitos das vigas com diferentes fibras de carbono tal que as três primeiras frequências obtidas experimentalmente com análise modal, também, foram ajustadas e identificadas com os modelos computacionais propostos; e
- Finalmente, foram apresentadas as propriedades mecânicas dessas fibras de carbono coladas com adesivo epóxi, tais como: Módulos de Elasticidade Ex, Ey e Ez; Módulos de Elasticidade Torcional Gxy, Gxz e Gyz e os Coeficientes de Poisson.

Com os resultados apresentados no capítulo 4, conclui-se que a metodologia proposta mostrou-se eficiente.

Apesar dos resultados terem apresentado erros menores que 2%, um dos experimentos foi desmontado e montado novamente e fizeram-se nele novos testes em uma banda menor, com o intuito de se obter um valor mais exato, devido à resolução da banda. Porém, o resultado obtido foi outro, como pode ser visto na Figura 5.1 e na Tabela 5.1.



Figura 5.1 – Receptância da viga de aço inoxidável unida à fibra de carbono unidirecional na banda de 0 a 20 Hz detalhando a identificação da frequência de 6,300 Hz

Tabela 5.1 – Frequências experimentais e computacionais do primeiro modo de vibrar e diferença percentual da viga composta por aço inoxidável e fibra de carbono unidirecional em duas bandas

| FREQUÊNCIAS | EXPERIMENTO | ANSYS | ERRO | BANDA |
|------------------|-------------|-------|-------|------------|
| F1 - uni [Hz] | 6,50 | 6,53 | 0,40% | 0 - 100 Hz |
| F1' - uni [Hz] | 6,30 | 6,53 | 3,58% | 0 - 20 Hz |

Dessa forma, chegou-se a conclusão de que o método pode ter várias fontes de erros, mesmo que pequenos. Por isso, propõe-se, para trabalhos futuros, novos experimentos com esses compostos, com vários valores de comprimentos, largura e espessura. E com esses resultados, fazer uma análise estatística para melhor confiabilidade dos resultados, pois, apesar da análise de erro ter demonstrado boa eficiência do método, os resultados apresentados neste trabalho são decorrentes de apenas um ensaio para cada material, sendo portanto, mais suscetível a erro.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTAGNÉDE, B.; JENKINS, J.T.; SACHSE, W.; BASTE, S.; *Optimal determination of the elastic constants of composite materials from ultrasonic wave-speed measurements, Journal of Applied Physics67.* 1990. 2753–2761.

FALLSTROM, K.E.; JONSSON, M.; *A nondestructive method to determine material properties in anisotropic plate, Polymer Composites* **12**. 1991. 293–305.

NIELSEN, S.A.; TOFTEGAARD, H.; *Ultrasonic measurement of elastic constants in fiber-reinforced polymer composites under influence of absorbed moisture, International Journal of Ultrasonic38.* 1998. 242–246.

BERMAN, A.; NAGY, E.J.; *Improvement of a large analytical model using test data, AIAA Journal21.* 1983. 1168–1173.

KAM, T.Y.; LEE, T.Y.; *Detection of cracks from modal test data,* International Journal of Engineering Fracture Mechanics42. 1992. 381–387.

KAM, T.Y.; LEE, T.Y.; *Crack size identification using and expanded mode method, International Journal of Solids and Structures31.* 1994a. 925–940.

KAM, T.Y.; LEE, T.Y.; *Identification of crack size via and energy approach*, *Journal of Nondestructive Evaluation13*. 1994b. 1–11.

KAM, T.Y.; LIU, C.K.; *Stiffness identification of laminated composite shafts, International Journal of Mechanical Sciences40.* 1998. 927–936.

WANG, W.T.; KAM, T.Y.; *Material characterization of laminated composite plates via static testing, Composite Structures50.* 2000. 347–352.

WANG, W.T.; KAM, T.Y.; *Elastic constants identification of shear deformable laminated composite plates, ASCE, Journal of Engineering Mechanics Division127.* 2001. 1117–1123.

MOUSSU, F.; NIVOIT, M.; *Determination of elastic constants of orthotropic plates by a modal analysis/Rayleigh–Ritz technique, Journal of Sound and Vibration124.* 1988. 269–283.

WILDE, W.P.; SOL, H.; Anisotropic material identification using measured resonant frequencies of rectangular composite plates, Proceedings of the Fourth International Conference on Composite Structures, Paisley College of Technology, Scotland, 1987, pp. 2.317–2.324.

ARAUJO, A.L.; MOTA SOARES, C.M.; MOREIRA, M.J.; Characterization of material parameters of composite plate specimens using optimization and experimental vibrational data, *Composites: Part B27 (B)*. 1996. 185–191.

ARAUJO, A.L.; MOTA SOARES, C.M.; HERSKOVITS, J.; PEDERSEN, P.; Development of a finite element model for the identification of mechanical and piezoelectric properties through gradient optimization and experimental vibration data, Composite Structures58. 2002. 307–318.

GRIMES, R. G.; LEWIS, J. G.; SIMON, H. D.; *A shifted block Lanczos algorithm for solving sparse symmetric generalized eigenproblems.* Society for Industrial *and Applied Mathematics*, Vol 15, Jan, 1994.

FURTADO, G.C. de A.; Análise dinâmica, através do método de elementos finitos, de um compensador síncrono de 150 mvar de fabricação Alstom. 2006 MARQUES, O. A.; Utilização do algoritmo de Lanczos em blocos na análise dinâmica de estruturas. 1991. 175p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991. 48-52

7 APÊNDICE

7.1 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

Neste apêndice são mostradas as especificações e características dos instrumentos utilizados:

- Martelo de impacto;
- Transdutor de força;
- Sensor de deslocamento LVDT;
- Condicionador de sinal do LVDT; e
- Analisador de espectro.

7.1.1 MARTELO DE IMPACTO E TRANSDUTOR DE FORÇA

O martelo de impacto utilizado foi o modelo 086C03 da marca PCB *Piezotronics,* que produz uma excitação do tipo transiente, e neste caso, foi imposta manualmente. Ele possui uma flexibilidade de mudança do material localizado no ponto em que o martelo excita a estrutura, onde se pode variar a sua rigidez de acordo com a faixa de frequência de interesse a ser excitada. Por exemplo, usa-se um material tipo elastómero para excitar em baixas frequências e o aço para altas frequências. Ao se excitar a estrutura com o martelo de impacto, essa é excitada em uma ampla faixa de frequência.

O Transdutor de força utilizado foi o modelo 480C02, também da marca PCB *Piezotronics* e teve a função de amplificar o sinal elétrico, propício para utilização com o analisador. A Figura 7.1 retrata esses dois instrumentos.



Figura 7.1 – Martelo de impacto e Transdutor de força

7.1.2 SENSOR LVDT E SEU CONDICIONADOR DE SINAIS

Foi utilizado, para a realização das medidas de deslocamento lineares, o sensor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) ou Transformador Linear Diferencial Variável. Ele é um transdutor de deslocamento linear eletromagnético, portanto, se aplica a ensaios com materiais metálicos.

Para converter o movimento linear do sensor, uma armadura ferromagnética, para uma tensão alternada, utilizou-se o condicionador de sinal de modelo 501A da marca SQI (*SpectraQuest, Inc.*) São mostrados na Figura 7.2 o sensor e seu condicionador de sinais.



Figura 7.2 – Sensor LVDT e condicionador de sinais

7.1.3 ANALIZADOR DE ESPECTRO

Através do uso de um sistema de aquisição com pelo menos dois canais de entrada, que meça a resposta de vibração da estrutura e a força de impacto de entrada, obtém-se uma função resposta em frequência (FRF), que identifica as frequências de ressonância. O processamento de dados é feito pelo analisador de espectro de modelo CF-350 da marca *Ono Sokki*, capaz de fornecer as características de resposta da estrutura no domínio do tempo e da frequência. Esse instrumento é apresentado na Figura 7.3.



Figura 7.3 – Analisador de espectro

7.2 BLOCK LANCZOS (BLOCO DE LANCZOS)

As equações resultantes da análise modal, sem a consideração da matriz de amortecimento (da Eq. 4.1), constituem um problema de autosolução, que consiste no cálculo dos autovalores e autovetores associados. O software ANSYS possui diversos algoritmos para obtenção do modelo dinâmico de estruturas. O utilizado neste trabalho foi o Bloco de Lanczos.

O método de Bloco Lanczos de extração de autovalores é aceitável para problemas de número elevado de nós e simétricos. Tipicamente, este mecanismo é aplicável para os tipos de problemas solucionáveis pelo método do subespaço, porém, com uma taxa de convergência mais rápida. Um bloco, denominado algoritmo de Lanczos, é a base da teoria de autosolução. Este método emprega uma estratégia automatizada de troca, combinada com a checagem da sequência de Sturm, para extrair o número de autovalores requisitados. Esta checagem também assegura que as frequências naturais além da faixa de frequência de análise fornecida pelo usuário, sejam encontradas sem perda de modos de vibração. O uso deste método para solução de problemas maiores (em torno de 100.000 graus de liberdade, por exemplo) pode requerer uma quantidade de memória computacional significativamente maior, devido à geração de um número muito elevado de equações de restrição. (Furtado, 2006)

Este algoritmo pode ser melhor explicado por MARQUES (1991) e por GRIMES (1994).