CARLOS EDUARDO BASSI MAIO

**Técnicas para monitoramento de integridade estrutural usando
sensores e atuadores piezoelétricos**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Dinâmica das Máquinas e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Areias Trindade

São Carlos

2011

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE
DA VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA
EESC-SP

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M227t	<p>Maio, Carlos Eduardo Bassi</p> <p>Técnicas para monitoramento de integridade estrutural usando sensores e atuadores piezoelétricos / Carlos Eduardo Bassi Maio ; orientador Marcelo Areias Trindade. -- São Carlos, 2010.</p> <p>Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.</p> <p>1. Materiais compósitos. 2. Integridade estrutural - monitoramento. 3. Método dos elementos finitos. 4. Monitoramento - técnicas. 5. Materiais piezoelétricos. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro CARLOS EDUARDO BASSI MAIO.

Dissertação defendida e julgada em 24/03/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **MARCELO AREIAS TRINDADE - (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Titular **PAULO SERGIO VAROTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. **RENATO PAVANELLO**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Associado **MARCELO AREIAS TRINDADE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho a minha família, principalmente, a meus pais Herminia e Antonio Carlos (in memorian), a meu padrasto Marco, a meu irmão Cesar e a minha noiva Natália, que sempre me deram força e apoio.

Agradecimentos

- Agradeço em primeiro lugar a Deus, sem o qual nada disso seria possível;
- Ao professor Dr. Marcelo Areias Trindade pela oportunidade, confiança e paciência, principalmente, ao longo deste trabalho. Por ter compartilhado comigo, desde os tempos da graduação, seu conhecimento e amizade, sendo um exemplo de competência e dedicação;
- À família da minha noiva, em especial, ao Geraldo e a Fátima que sempre me apoiaram e incentivaram durante a realização deste trabalho;
- A todos os funcionários do Laboratório de Dinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos;
- Aos professores da banca de defesa, pela disposição e sugestões que ajudaram a enriquecer o conteúdo desta dissertação;
- À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), esta pelo apoio financeiro e aquela pela sólida base acadêmica que me proporcionou durante a graduação e pós-graduação;
- E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para realização deste projeto.

“O homem é do tamanho do seu sonho.”

Fernando Pessoa (1888-1935), poeta português

Resumo

MAIO, C.E.B. Técnicas para monitoramento de integridade estrutural usando sensores e atuadores piezoelétricos. 2011. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

A utilização de materiais piezoelétricos, na função de sensores e atuadores distribuídos, para o controle e monitoramento de vibrações estruturais tem um enorme potencial de aplicação nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automobilística e eletroeletrônica. O uso de sensores piezoelétricos integrados para monitoramento de integridade estrutural (ou detecção de falhas), em particular, tem evoluído bastante na última década. Por conseguinte, o número de técnicas utilizadas para esse fim são as mais variadas possíveis. Dentre elas estão às técnicas que avaliam o efeito dos danos em baixa frequência usando parâmetros modais, em especial frequências naturais e modos, ou em média-alta frequência medindo-se a impedância/admitância eletromecânica. O objetivo dessa dissertação é desenvolver, com auxílio de um modelo 2D ANSYS em elementos finitos, uma análise de diferentes técnicas para detecção da posição e tamanho da delaminação em estruturas compósitas utilizando pastilhas piezoelétricas. Várias métricas e técnicas são avaliadas em termos de sua capacidade de identificar, com relativa acurácia, a presença, localização e severidade do dano. Os resultados mostram que ambas as técnicas modal e baseada na impedância são capazes de identificar a presença de danos do tipo delaminação, desde que as pastilhas piezoelétricas estejam próximas do dano. Também é mostrado que as técnicas baseadas na impedância parecem ser mais eficientes do que as modais para detecção da posição e tamanho da delaminação.

Palavras-chave: Estruturas Inteligentes; Materiais Piezoelétricos; Elementos finitos; Monitoramento de Integridade Estrutural; Técnicas de Monitoramento.

Abstract

MAIO, C.E.B. Techniques for structural health monitoring using piezoelectric sensors and actuators. 2011, 113 p. Master's dissertation - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos.

The use of piezoelectric materials in the function of distributed sensors and actuators for the control and monitoring of structural vibrations has enormous potential for application in the aeronautical, aerospace, automotive and electronics. The use of integrated piezoelectric sensors for structural health monitoring (or damage detection), in particular, has evolved greatly over the last decade. Consequently, the numbers of techniques used for this purpose are highly diverse. Among them are techniques that evaluate the effect of damages on low frequency modal parameters, especially natural frequencies and mode shapes, or on medium-high frequency measurements of electromechanical impedance/admittance. The objective of this dissertation is to perform, with the aid of a 2D ANSYS finite element model, an analysis of different techniques for the detection of position and size of a delamination in a composite structure using piezoelectric patches. Several metrics and techniques are evaluated in terms of their capability of identifying, with relative accuracy, the presence, location and severity of the damage. Results show that both modal and impedance-based techniques are able to identify the presence of the delamination-type damages, provided the piezoelectric patches are close enough to the damage. It is also shown that impedance-based techniques seem more effective than modal ones for the detection of delamination position and size.

Keywords: Smart Structures; Piezoelectric Materials; Finite Elements; Structural Health Monitoring; Monitoring Techniques.

Sumário

Introdução e Análise Bibliográfica	21
1.1. Motivação	21
1.2. Análise Bibliográfica	22
1.2.1. Técnicas de Monitoramento da Integridade Estrutural	22
1.2.2. Detecção de falhas utilizando materiais piezoelétricos	25
1.2.3. Modelos de delaminação	31
1.3. Objetivos	34
Modelagem	35
2.1. Características do Modelo	35
2.2. Modelagem em Ansys	37
2.3. Formulação teórica para análise harmônica	54
Índices utilizados para detecção	57
3.1. Índices Modais	57
3.1.1. <i>Variação Relativa das Frequências Naturais (VRFN)</i>	57
3.1.2. <i>Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (VEMCC)</i>	59
3.2. Índices Baseados na Resposta em Frequência	60
3.2.1. <i>Desvio quadrático médio (RMSD)</i>	61
3.2.2. <i>Desvio Médio Absoluto Percentual (MAPD)</i>	62
3.2.3. <i>Covariância (COV)</i>	63
3.2.4. <i>Desvio do Coeficiente de Correlação (CCD)</i>	63
3.2.5. <i>Desvio do Coeficiente de Correlação ao Cubo (CCD³)</i>	64
3.2.6. <i>Norma Infinita (H_{inf})</i>	64
3.2.7. <i>Norma Quadrada ou Euclidiana (H₂)</i>	65
Resultados	66
4.1. Análise Modal	66
4.2. Análise Harmônica	72
Conclusões e Perspectivas	105
ANEXO I	113

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama esquemático de um piezoelétrico polarizado na direção 3.....	27
Figura 2: Malha de elementos finitos aplicada ao modelo da estrutura para uma delaminação de 60 mm, construída a partir da subtração de material da primeira e segunda camada em formato de uma elipse.....	34
Figura 3: Representação esquemática das propriedades geométricas do modelo.....	36
Figura 4: Diagrama das etapas do processo de modelagem utilizando ANSYS.....	37
Figura 5: Representação do elemento PLANE82 e PLANE223 e posição dos nós, nas versões quadrangular e triangular, conforme convenção adotada pelo ANSYS [38].	38
Figura 6: Modelo da estrutura com delaminação de 10 mm com seu centro posicionado a 60 mm do engaste, construído a partir de áreas retangulares.	40
Figura 7: Representação das estruturas que compõem o modelo de acordo com suas propriedades e elementos diferenciadas pelas cores roxa, azul e vermelha.	42
Figura 8: Representação da malha de Elementos Finitos criada a partir de elementos quadrangulares de comprimento 1 mm, com refinamento em Y nas pastilhas piezoelétricas e nas duas primeiras camadas onde encontra-se a delaminação.....	43
Figura 9: Nós que unem a primeira pastilha piezoelétrica ao resto da estrutura, acoplados através do comando MERGE.	44
Figura 10: Representação do equipotencial realizado na superfície superior das pastilhas piezoelétricas utilizando o comando Couple DOFs.	44
Figura 11: Aplicação das condições de contorno elétricas, circuito fechado para duas pastilhas piezoelétricas, e estruturais, restrições aos deslocamentos X e Y dos nós pertencentes às linhas que se encontram a extremidade esquerda da viga.	45
Figura 12: Representação das condições de contorno elétricas e estruturais aplicadas aos nós. É possível visualizar na pastilha piezoelétrica a aplicação da condição de contorno elétrica, circuito fechado, juntamente com o equipotencial.	46
Figura 13: Status da Solução onde são apresentados todos os parâmetros utilizados no cálculo da solução.	47
Figura 14: Representação de alguns modos de vibrar da estrutura configurada para uma delaminação de 10 mm, posicionada a 60 mm do engaste e com condição de contorno elétrica de circuito fechado para os dois PZTs: (a) 14 primeiros modos de vibrar da viga engastada livre e (b) zoom para os 10, 20, 30, 40 e 50º modos de vibrar com destaque para a delaminação.	48

Figura 15: Representação da estrutura aplicando-se uma excitação de carga elétrica na superfície da primeira pastilha piezoelétrica e ajustando-se as condições de contorno elétricas da segunda pastilha para circuito aberto.	51
Figura 16: Status da Solução onde são apresentadas todas as configurações utilizadas para calcular a resposta harmônica.	52
Figura 17: Modelo da estrutura após o cálculo da resposta harmônica, com destaque para forças e condições de contorno que agem sobre as duas pastilhas piezoelétricas.	53
Figura 18: Variação das frequências naturais em relação à referência para os cem primeiros modos com os PZTs 1 e 2 em circuito fechado (a) delaminação posicionada a 60 mm do engaste variando-se seu comprimento em 10, 20 e 30 mm; (b) delaminação de 30 mm de comprimento variando-se sua posição em relação ao engaste em 60, 85 e 110 mm.	67
Figura 19: Médias da variação das frequências naturais para quatro faixas, calculadas de 25 em 25 modos de vibração, das três posições de delaminação (60, 85 e 110 mm) nos três tamanhos de falhas (10, 20 e 30 mm), com os dois PZTs em circuito fechado.	68
Figura 20: Comparação da Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (EMCC), em pontos percentuais, dos PZTs 1 e 2 em relação à referência para os cem primeiros modos de vibração com uma delaminação de 30 mm (a) delamiação posicionada a 60 mm do engaste; (b) delaminação posicionada a 110 mm do engaste.	69
Figura 21: Médias do <i>VEMCC</i> , em pontos percentuais, em relação à referência para quatro faixas, calculadas de 25 em 25 modos de vibração, das três posições de delaminação 60, 85 e 110 mm, nos três tamanhos de falhas 10, 20 e 30 mm, (a) média do EMCC do PZT 1; (b) média do EMCC do PZT 2.	70
Figura 22: Funções de Resposta em Frequência para estrutura sem delaminação e com delaminação de 30 mm, posicionada a 60 mm do engaste, calculadas para Parte Real, Parte Imaginária e Amplitude da Impedância.	73
Figura 23: Funções de Resposta em Frequência para estrutura sem delaminação e com delaminação de 30 mm, posicionada a 60 mm do engaste, calculadas para Parte Real, Parte Imaginária e Amplitude da Admitância.	74
Figura 24: Funções de Resposta em Frequência para estrutura sem delaminação e com delaminação de 30 mm, posicionada a 60 mm do engaste, calculadas para Parte Real, Parte Imaginária e Amplitude da Elastância.	75
Figura 25: Representação dos gráficos de barras que serão utilizados nas análises. (a) gráfico para se determinar a crescimento da delaminação; (b) gráfico para se determinar a posição da delaminação.	77

Figura 26: Gráficos das médias dos índices normalizados tidos como ideais para o caso em estudo (a) critério de crescimento; (b) critério de posição.	78
Figura 27: Índices calculados com base na Parte Real, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d, e) Impedância; (f, g) Admitância.....	79
Figura 28: Índices calculados com base na Parte Imaginária, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d) Impedância; (e, f) Elastância.	81
Figura 29: Índices calculados com base na Amplitude da Impedância, que se comportaram segundo o critério 1.	83
Figura 30: Médias dos índices normalizadas calculados sobre a Parte Real, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d, e) Impedância; (f, g) Admitância.	85
Figura 31: Médias dos índices normalizados calculadas sobre Parte Imaginária, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d) Impedância; (e, f) Elastância.....	86
Figura 32: Médias dos índices normalizados calculadas sobre a Amplitude da impedância, que se comportaram segundo o critério 1.....	87
Figura 33: Comparação dos Índices com melhor desempenho (critério 1) com o valor considerado ideal (a) índice $RMSD_{GR}$ calculado para Parte Imaginária e Amplitude da Impedância; (b) índice $RMSD_{GR}$ calculado para Parte Real da Impedância; (c) índice H_2 calculado para Parte Imaginária e Amplitude da Impedância.	88
Figura 34: Índices calculados com base na Parte Real dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (a, b) Impedância; (c, d, e, f, g) Admitância e (1h, 2h) Elastância....	90
Figura 35: Índices calculados com base na Parte Imaginária dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) Impedância; (1b, 2b, 3b) Admitância e (c, d) Elastância.....	93
Figura 36: Índices calculados com base na Amplitude dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) impedância; (1b, 2b) admitância e (1c, 2c) elastância.	95
Figura 37: Média dos índices normalizados calculadas com base na Parte Real dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (a, b) Impedância; (c, d, e, f, g) Admitância e (1h, 2h) Elastância.	97
Figura 38: Média dos índices normalizados calculadas com base na Parte Imaginária dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) Impedância; (1b, 2b, 3b) Admitância e (c, d) Elastância.	99
Figura 39: Média dos índices normalizados calculadas com base na Amplitude dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a,) Impedância; (1b, 2b) Admitância e (1c, 2c) Elastância.....	100

Figura 40: Índices que apresentaram valores aproximados, para o PZT 1 e 2, quando calculados para delaminação posicionada a 85 mm do engaste e comparados com seus valores esperados. Parte Real: (a) Admitância (b) Elastância; Parte Imaginária: (c) Admitância (d, e) Impedância; Amplitude: (f) Admitância (g, h) Impedância (i, j) Elastância..... 101

Lista de Tabelas

Tabela 1: Frequência natural dos cem primeiros modos de vibrar da estrutura sem defeitos e com as duas Pastilhas Piezoelétricas em circuito fechado.	66
Tabela 2: Apresentação dos índices que foram selecionados utilizando o critério (1) crescimento da falha; e (2) posição da falha.....	78
Tabela 3: Índices que satisfizeram o critério 1, pré-estabelecido, separados pelas grandezas e medidas para as quais eles foram calculados.....	87
Tabela 4: Índices que atendem o critério 2 e assinalados por * aqueles que apresentam para posição de delaminação de 85 mm valores que não se excedam em 10%.	101
Tabela 5: Razões entre os valores de cada Índice (H_2) calculado para o PZT 1 e PZT 2 para as três posições de delaminação.....	103

Capítulo 1

Introdução e Análise Bibliográfica

1.1. Motivação

O estudo de controle e monitoramento de estruturas têm avançado bastante nos últimos anos graças à crescente possibilidade do desenvolvimento de sistemas de controle totalmente integrados à estrutura a ser controlada/monitorada. Isto vem sendo possibilitado de um lado pelo crescente desenvolvimento de estruturas compósitas laminadas e por outro lado pelo crescente desenvolvimento de materiais funcionais, ditos “inteligentes”, que podem ser integrados nestas estruturas compósitas como atuadores e/ou sensores distribuídos. É quase desnecessário afirmar que a possibilidade de se construir uma estrutura compósita cujos componentes (ou camadas, por exemplo) sejam capazes de prover à estrutura os níveis de amortecimento necessário para dada operação, a capacidade de adaptar suas propriedades em função do ambiente de operação, e a função de monitoramento, e possivelmente de correção, de sua integridade estrutural ao longo do tempo, teria um enorme potencial de aplicação nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automobilística e eletroeletrônica.

As técnicas de monitoramento da integridade estrutural (SHM, do inglês Structural Health Monitoring) também têm sido tema de grandes grupos de estudos técnico e científico nas últimas duas décadas. Esta tendência pode ser atribuída aos elevados custos de manutenção e reparo, além do valor inestimável da perda de vidas, associada a danos que se propagam ao longo da estrutura causando em última instância acidentes catastróficos. Com o passar do tempo, o custo de manutenção e reparo de mecanismos e estruturas tornam-se cada vez mais preocupantes. O monitoramento da integridade estrutural pode amenizar esta situação, uma vez que substitui a manutenção programada pela manutenção necessária, diminuindo manutenções fora de hora, que atrapalham a produção em grandes indústrias e ocasionam gargalos em companhias prestadoras de serviços, que deixam de operar com sua capacidade máxima. Tais fatos podem ser evitados com a instalação de um sistema de monitoramento na estrutura, fornecendo maior segurança e confiabilidade a esses mecanismos, ou em novas estruturas, com a inclusão de sensores/atuadores para o monitoramento desde a concepção, reduzindo custos e prolongando a vida útil do produto.

1.2. Análise Bibliográfica

Nesta seção serão abordados os princípios teóricos utilizados na realização dessa dissertação.

1.2.1. Técnicas de Monitoramento da Integridade Estrutural

O monitoramento da integridade estrutural pode ser considerado como um processo de detecção de dano, este, por conseguinte, é definido como uma alteração adversa causada na estrutura que afeta o desempenho, presente ou futuro, do sistema [21]. Os danos que podem ocorrer em uma estrutura são os mais variados possíveis e dependem muito das condições de uso e das condições do ambiente aos quais estas estruturas estão sujeitas. Os danos mais comuns são as fissuras, delaminações e descolamentos, estas duas últimas ocorrendo mais em estruturas compósitas.

O efeito do dano na estrutura pode ser classificado como linear ou não-linear. No dano dito linear, a estrutura que apresenta comportamento linear elástico mantém o mesmo comportamento após o surgimento do dano. As mudanças nas propriedades modais são o resultado da mudança na geometria e/ou propriedade dos materiais da estrutura, mas a resposta da estrutura ainda pode ser modelada através de equações do movimento lineares. Já no dano dito não-linear, a estrutura inicialmente com comportamento linear elástico passa a se comportar de maneira não linear após a introdução do dano. Um exemplo de dano não-linear é a formação de uma trinca por fadiga, ocasionada pelo constante abrir e fechar de uma pequena fissura gerada pelo funcionamento normal em ambientes vibratórios. A maioria dos trabalhos aborda somente o problema de detecção de dano linear [11].

A vantagem de se utilizar técnicas de monitoramento da integridade estrutural é a possibilidade de se identificar o dano em seu estágio inicial, o que em situações críticas de segurança como, por exemplo, falhas em reatores nucleares, pode salvar um grande número de vidas, ou até mesmo em situações industriais em que alterações no funcionamento de equipamentos podem causar diminuição da qualidade e/ou interrupção da produção.

Existem duas formas de se estudar o monitoramento da integridade estrutural. Na primeira, é desenvolvido um modelo matemático para a estrutura danificada, medido o sinal da estrutura real, que é confrontado com o resultado prévio do modelo matemático para se determinar a presença do dano, essa forma é conhecida como problema direto, e é utilizado geralmente em estruturas simples, fácil de modelar analiticamente. Na segunda, não existe um modelo matemático para estrutura danificada e a detecção do dano é feita através da comparação do sinal medido da estrutura em momentos distintos, sendo que alterações entre

os sinais indicam a presença do dano. Essa forma, conhecida como problema inverso, é a mais utilizada na literatura [11] e também será utilizada neste trabalho. No entanto, os ensaios de medição da resposta da estrutura serão simulados em um software de elementos finitos, permitindo um controle maior sobre o dano a ser estudado.

Para diferenciar os diversos métodos de monitoramento e seus respectivos modos de atuação torna-se necessário utilizar um critério de classificação de dano em níveis crescentes de dificuldade de implementação. Isto foi feito inicialmente usando quatro níveis [40]:

- 1) Detectar a existência da falha;
- 2) Detectar e localizar a falha;
- 3) Detectar, localizar e caracterizar (quantificar) a falha;
- 4) Detectar, localizar e quantificar a falha e então estimar o tempo de vida restante.

Posteriormente foram acrescentados mais três níveis a essa classificação, todos incorporando a utilização de materiais inteligentes [22]:

- 5) Combina o nível 4 com estruturas inteligentes para auto-diagnosticar falhas estruturais;
- 6) Combina o nível 4 com estruturas inteligentes e controle para formar um sistema de auto-reparo estrutural;
- 7) Combina o nível 1 com controle ativo e estruturas inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

Os métodos não destrutivos tradicionalmente empregados para detectar danos são visuais ou experimentais, realizados localmente, como ondas acústicas ou ultrassônicas, campos magnéticos, radiografias, líquido penetrante, etc. Todos estes experimentos supõem que a pessoa que aplicará a técnica conheça, mesmo que de forma intuitiva, a região onde supostamente está o dano e que essa região seja acessível. Essas limitações geraram a necessidade de se desenvolver métodos de detecção mais autônomos aplicáveis a estruturas complexas (que por sua disposição e condição de uso impossibilitam o acesso humano), e que dependam o mínimo possível da interferência humana, capazes de identificar o dano através do monitoramento contínuo e em tempo real, baseados na alteração da resposta da estrutura provocada pelo dano.

Os métodos existentes podem ser analisados no domínio do tempo, da frequência ou modal, entretanto a maioria das pesquisas tem sido realizadas no domínio modal, uma vez que as frequências naturais e os modos são facilmente interpretados, o que os tornam mais atrativos para se realizar análises mais complexas.

Nos últimos anos muitas técnicas utilizando vibrações foram desenvolvidas para detecção de falhas. Estas levam em consideração o comportamento dinâmico da estrutura que é influenciado pelo dano, sendo possível identificar a ocorrência do dano, monitorando-se as alterações nos parâmetros modais como frequências, modos de vibração e amortecimento modais. Assim, mudanças nas propriedades físicas da estrutura podem ser detectadas através de mudanças nas propriedades modais da estrutura. Doebling et al. [12] apresenta uma detalhada revisão sobre os métodos de vibrações utilizados no monitoramento de integridade estrutural. O autor explicita que técnicas envolvendo frequências e modos de vibrações são muito utilizadas na prática, entretanto, aquelas utilizando o amortecimento são pouco exploradas pelo fato de apresentarem não linearidades devido aos efeitos dissipativos.

Estudos comparativos utilizando frequências e modos de vibração em métodos de identificação de dano para estruturas tipo viga podem ser encontrados em [25,29,32,33]. Estes estudos mostraram que as frequências e as respostas correspondentes aos três primeiros modos de vibração são suficientes para detectar a existência da falha (nível 1).

Além dos métodos baseados na comparação da resposta vibratória, métodos alternativos, que associam redes neurais, algoritmos genéticos e materiais inteligentes às técnicas de monitoramento, estão sendo altamente requisitados para o processo de quantificação do dano. Por esta razão, as técnicas de monitoramento, estão sendo focadas no desenvolvimento de sistemas para o monitoramento baseados nas propriedades diferenciadas dos materiais inteligentes que associados ao uso de estratégias computacionais mais sofisticadas, para o processamento dos sinais, torna possível alcançar níveis mais elevados de classificação do dano.

Algumas das técnicas mais utilizadas para resolver o problema de SHM são: 1) no domínio da frequência, as técnicas de impedância e ondas guiadas; e 2) no domínio do tempo, as técnicas de análise de séries temporais. Alterações nos parâmetros modais (p.ex. frequências naturais) podem ser identificadas a partir da resposta da estrutura. Algoritmos de otimização, usando algoritmos genéticos e redes neurais artificiais, podem ser utilizados para representar o efeito do dano [30]. Em ambos os casos, materiais piezoelétricos podem ser utilizados como sensores e atuadores.

Embora o campo de pesquisa em SHM seja muito vasto e as técnicas utilizadas para esse fim sejam muito promissoras, o objetivo final de tais estudos é encontrar um ou mais indicadores de dano que consiga da melhor maneira possível diferenciar a estrutura sadia da estrutura com defeito.

1.2.2. Detecção de falhas utilizando materiais piezoelétricos

Dentre os materiais inteligentes mais aplicados no desenvolvimento do monitoramento de integridade estrutural estão os materiais piezoelétricos. Devido a sua natureza dielétrica, os materiais piezoelétricos possuem a propriedade de produzir uma deformação ou tensão a partir da aplicação de um campo elétrico e vice-versa. Desta maneira, eles podem ser utilizados como sensores, para monitorar a resposta do sistema a perturbações do ambiente, e como atuadores, para agir sobre a estrutura a fim de fornecer o comportamento adequado.

O efeito piezoelétrico tem sido observado em diversos materiais como nos cristais naturais de quartzo, turmalina, topázio e sal de Rochelle, entretanto, ele pode ser artificialmente gerado. Materiais piezoelétricos sintéticos (cerâmica e polímeros), quando manufaturados, são constituídos por dipolos elétricos que estão orientados de maneira aleatória em seu substrato (material anisotrópico), estes quando submetidos a um campo elétrico externo tendem a se anularem. Com o objetivo de manter os dipolos permanentemente alinhados e assim gerar uma resposta a um campo elétrico, um processo de polarização é necessário.

A polarização consiste em elevar a temperatura do material acima da temperatura de Curie (temperatura na qual os dipolos podem mudar de orientação na fase sólida) e aplicar um campo elétrico muito forte sobre ele na direção que se quer a polarização. O material é então resfriado abaixo da temperatura de Curie enquanto o campo elétrico é mantido, desta forma o alinhamento dos dipolos é fixado permanentemente e o material é dito polarizado, o que favorece o acoplamento eletromecânico [39].

Quando o material piezoelétrico é mantido abaixo dessa temperatura e submetido a um campo elétrico menor do que aquele utilizado para polarização, os dipolos respondem coletivamente produzindo uma expansão macroscópica ao longo do eixo de polarização e uma contração perpendicular a este. Esta propriedade é chamada de efeito piezoelétrico inverso, isto é, o material deforma mecanicamente quando um campo elétrico externo é aplicado sobre ele, o que confere ao material a capacidade de atuação [39].

Por outro lado, quando o material piezoelétrico é mecanicamente deformado ocorre a deformação/rotação dos dipolos originalmente alinhados, provocando o surgimento de uma distribuição de cargas elétricas na superfície do material. Esta propriedade é chamada de efeito piezoelétrico direto que possibilita que o material seja utilizado como sensor.

A relação campo elétrico-deformação é aproximadamente linear para baixas intensidades do campo elétrico, o que é uma vantagem quando se utiliza o efeito piezoelétrico

em sistemas de controle. Entretanto, para maiores intensidades de campo elétrico, ocorre um fenômeno de saturação da polarização, com a inversão dos dipolos elétricos, isto provoca uma significativa histerese e relações não lineares entre o campo e a deformação [41]. Embora a teoria não linear da piezoelectricidade esteja bem estabelecida, quando analisamos uma estrutura em pequenas deformações (muito utilizada na prática) a teoria linear é suficiente. Desta forma, equações lineares da piezoelectricidade são frequentemente empregadas pelos pesquisadores. A teoria linear da piezoelectricidade assume um movimento quase estático indicando que as forças elétricas e mecânicas são balanceadas em um dado instante de tempo, estas equações (1a) e (1b) são escritas da seguinte forma [20]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{s}^E \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{d} \mathbf{E} \quad (\text{efeito piezoeletrico inverso}) \quad (1a)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\epsilon}^E \mathbf{E} \quad (\text{efeito piezoeletrico direto}) \quad (1b)$$

onde $\mathbf{D}$ é o vetor de deslocamento elétrico (carga/área), $\mathbf{E}$ é o vetor campo elétrico (volts/metro), $\boldsymbol{\varepsilon}$ é o tensor das deformações, $\boldsymbol{\sigma}$ é o tensor das tensões mecânicas, $\mathbf{s}^E$ é o tensor dos coeficientes de flexibilidade medido a campo elétrico constante (geralmente zero), $\mathbf{d}$ é o tensor dos coeficientes piezoeletricos de deformação (acoplamento das equações mecânica e elétrica devido ao efeito piezoeletrico), $\boldsymbol{\epsilon}^E$ é o tensor dos coeficientes dielétricos medidos a tensão constante (geralmente zero).

As equações (1a) e (1b) podem ser simplificadas quando o elemento piezoeletrico é carregado uniaxialmente com uma tensão normal ou cisalhante e só um par de eletrodos está presente para gerar um campo elétrico externo com componente em uma só direção. Estes modos comuns de operação podem ser descritos como: longitudinal (força e campo na direção 3), transverso (força na direção 1 ou 2 e campo na direção 3) e cisalhante (força no plano 23 ou 13 e campo na direção 2 ou 1 respectivamente). As direções podem ser vistas na figura 1. Cada um desses modos está associado com um característico coeficiente de acoplamento eletromecânico (EMCC) que mede a taxa de conversão de energia mecânica em elétrica e vice versa [19,46].

Figura 1: Diagrama esquemático de um piezoelétrico polarizado na direção 3.

O uso de materiais piezoelétricos no monitoramento de estruturas e controle de estruturas flexíveis foi bastante estudado nas últimas duas décadas [44]. Estes materiais se adaptam muito bem ao monitoramento e controle distribuído de vibrações estruturais já que se apresentam na forma de lâminas ou pastilhas muito finas que podem ser inseridas na estrutura. Dentre elas, os mais freqüentemente utilizados são as piezocerâmicas e piezopolímeros, destacando-se as pastilhas PZT (zirconato titanato de chumbo) e o PVDF (fluorido de polivídelideno). Devido às suas características de cerâmica, os PZTs apresentam grande rigidez, altos coeficientes de acoplamento eletromecânico e trabalham em larga faixa de freqüência, além de possuírem característica dual do efeito piezoelétrico que permite que elas sejam adaptáveis tanto como sensores como atuadores. A sua grande desvantagem é sua fragilidade mecânica o que dificulta a sua utilização em estruturas com geometrias mais complexas. Como alternativa apresentam-se os PVDF geralmente sob a forma de filmes finos, são conhecidos pela sua flexibilidade, durabilidade e baixo peso [41].

Embora grande parte dos estudos realizados até então consista em colar pastilhas piezoelétricas na superfície da estrutura a ser controlada/monitorada por facilidade construtiva, o uso crescente de materiais compósitos permite que se pense em projetar estruturas compósitas possuindo além de suas camadas com objetivos estruturais também algumas camadas piezoelétricas “inteligentes” para o controle/monitoramento contínuo da estrutura. Uma das estratégias para otimizar estruturas laminadas inteligentes com inserções de camadas piezoelétricas é através da utilização de pastilhas piezoelétricas polarizadas ao longo de seu comprimento ou largura, ao invés de ao longo da espessura como habitualmente. Este conceito inovador faz a pastilha piezoelétrica atuar usando o seu modo de cisalhamento, inicialmente sugerido por Sun [42,53]. Estudos anteriores mostraram que os atuadores piezoelétricos em cisalhamento induzem momentos distribuídos, ao invés de forças concentradas no contorno, e que, portanto, estariam menos sujeitos ao problema de

delaminação [42,53] e também teriam um desempenho menos dependente do tamanho e da posição dos atuadores [4,5]. Outros grupos de pesquisa também têm se dedicado ao tema de atuadores piezoelétricos em cisalhamento recentemente [1,24,37,49].

O uso de sensores piezoelétricos integrados para monitoramento de integridade estrutural (p.ex. detecção de falhas), em particular, tem evoluído bastante na última década e é hoje a principal linha de pesquisa de importantes grupos de pesquisa nos EUA e na Europa. Dentre as técnicas que utilizam esse tipo de material, existem aquelas que fornecem informações globais da estrutura, baseadas na variação da resposta vibracional da pastilha piezoelétrica, como a frequência modal, e conseqüentemente o EMCC, e aquelas que fornecem informações locais, utilizando altas frequências, como às técnicas de impedância/admitância [34,35] e as técnicas de ondas guiadas [26,36]. A técnica de onda guiada utiliza atuadores e sensores piezoelétricos para a geração e recepção de ondas guiadas na estrutura tal que o sinal emitido pelos sensores piezoelétricos fornece informações acerca de uma possível falha localizada no caminho da onda. Este grupo de técnicas possibilita uma maior precisão quanto à localização, forma e tamanho da falha, mas é fortemente dependente do adequado direcionamento das ondas. Apesar de ser muito utilizada em detecção, esta técnica não será alvo desse trabalho.

1.2.2.1 Variação do Coeficiente de Acoplamento Mecânico (EMCC)

O Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico é definido como a raiz quadrada da razão entre a energia mecânica armazenada e a energia elétrica aplicada no material piezoelétrico. O EMCC dinâmico (recebe este nome por utilizar em seu cálculo as frequências naturais de circuito aberto e fechado da pastilha piezoelétrica) é considerado uma propriedade dos materiais piezoelétricos, pois mede quão eficiente é a conversão de energia mecânica em energia elétrica e vice e versa [19], e é também utilizado como parâmetro de diferenciação entre os diversos tipos de materiais piezoelétricos. Quando o material piezoelétrico é unido à estrutura, o EMCC calculado a partir da pastilha passa a ser influenciado por toda a estrutura, ou seja, a rigidez da estrutura tende a reduzir o EMCC da pastilha devido ao acoplamento entre os materiais. Assim, alterações na rigidez da estrutura, devido ao dano, alteram a energia de deformação da pastilha nas vizinhanças do dano, alterando também a energia elétrica armazenada na pastilha devido ao acoplamento eletromecânico, que afetará a conversão de energia na pastilha e conseqüentemente o EMCC. Este comportamento sugere a possível utilização do EMCC como indicador de dano, pois sua variação para a estrutura com dano, se

comparado àquele para a estrutura sem dano, indicaria a presença do dano dentro de uma margem de tolerância.

O EMCC é calculado a partir das frequências naturais da estrutura, nas condições de circuito fechado e aberto para a pastilha piezelétrica de interesse. Assim sendo, o uso de variações do EMCC para a detecção de falhas se enquadra na categoria de técnicas modais e, portanto, pode ser comparado às técnicas que usam variações das próprias frequências naturais. Ambas as técnicas são aplicadas em regiões de baixas frequências e fornecem informações acerca do comportamento global da estrutura. Benjeddou et. al. [6] realizaram um estudo comparativo entre as técnicas de monitoramento que utilizam a variação do EMCC e da frequência modal. Para realizar a comparação, eles utilizaram um modelo de estrutura em que o estado danificado foi representado pela substituição do material do local onde se encontrava o dano por outro material menos rígido. Os resultados mostram que as variações dos índices da estrutura com dano, em comparação àqueles da estrutura sem dano, quando utilizando o EMCC são superiores àquelas utilizando a frequência, o que torna o EMCC mais atraente para o estudo de SHM.

1.2.2.2. *Técnicas de Impedância/Admitância*

A técnica de monitoramento baseada na impedância foi proposta pela primeira vez por Liang et. al. [27] e a partir de então tem sido aplicada em diversos experimentos e para uma grande variedade de estruturas por ser uma técnica de monitoramento em tempo real e relativamente fácil de implementar. O conceito básico dessa técnica é a utilização da impedância mecânica da estrutura para monitorar o surgimento de danos. Entretanto, medir a impedância mecânica da estrutura em tempo real não é viável na prática. Ao invés disso, variações na impedância mecânica podem ser calculadas indiretamente através da medição da impedância elétrica de pastilhas piezelétricas conectadas à estrutura. Devido ao acoplamento mecânico entre pastilhas e estrutura, a presença do dano na estrutura deveria afetar a impedância eletromecânica das pastilhas piezelétricas. Medindo-se a impedância eletromecânica da estrutura acoplada e comparando-a com um modelo de referência, estrutura sem defeito, é possível determinar qualitativamente a ocorrência do dano. Com intuito de melhorar a sensibilidade a danos incipientes, a impedância elétrica é medida em altas frequências, na faixa de dezenas de kHz, visto que nestas faixas o comprimento da onda de excitação é pequeno e sensível o suficiente para detectar pequenas mudanças da integridade estrutural. Outra vantagem de se trabalhar com alta frequência é que para geração do sinal de excitação exige-se baixa tensão, inferior a 1V. A principal característica do método da

impedância para o monitoramento da integridade estrutural é a utilização da pastilha piezoelétrica como sensor e atuador simultaneamente, usando o mesmo material para atuação e sensoriamento esse método não só reduz o número de sensores e atuadores, mas também reduz a quantidade de cabos elétricos e hardware.

Abaixo será apresentada a formulação unidimensional tipicamente utilizada para representar a pastilha piezoelétrica, PZT, unida a estrutura, apresentada por Liang et al. [27]. Este modelo supõe que o PZT é um atuador axial e está conectado no final de um sistema massa-mola de um grau de liberdade.

Resolvendo as equações constitutivas unidimensionais para o material piezoelétrico e levando em conta a interação de força entre ele e a estrutura, Liang et al. [27] chegou à seguinte expressão para a admitância elétrica do material piezoelétrico,

$$Y = \omega i \frac{A_p}{h_p} \cdot \left[\bar{\epsilon}_{33}^T - \frac{Z}{Z_A + Z} d_{31}^2 \bar{Y}_p^E \right] \quad (2)$$

onde A_p e h_p são área e altura da pastilha piezoelétrica, respectivamente, $\bar{\epsilon}_{31}^T$ é a constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero, d_{31} é a constante de acoplamento piezoelétrica, $\bar{Y}_p^E$ é o módulo de Young complexo do PZT com campo elétrico zero, Z é impedância mecânica da estrutura e Z_A é a impedância mecânica do PZT.

O primeiro termo da equação (2) denota a impedância elétrica da pastilha livre ($Z=0$) que é basicamente função de sua capacitância ($C_p^T = \bar{\epsilon}_{33}^T A_p / h_p$). Já o segundo termo é função das impedâncias mecânicas da pastilha e da estrutura e, portanto, pode ser sensível a variações da impedância mecânica da estrutura causadas pelo dano. Pelo fato da constante dielétrica do material, $\bar{\epsilon}_{33}^T$, ser mais sensível a temperatura e não estar relacionada ao dano na estrutura, a parte real da admitância elétrica é mais utilizada em aplicações de monitoramento de integridade estrutural [10].

Apesar disso, Bhalla et al. [7] introduziu um novo conceito, o “sinal ativo”, através do qual é possível utilizar a componente de interação direta do sinal após filtrar a componente inerte, a componente passiva do PZT. A componente ativa mostrou-se ser mais favorável ao monitoramento da estrutura com superior tolerância a variação de temperatura. O procedimento torna possível a utilização da parte imaginária tão bem quanto à parte real, maximizando as informações sobre a condição da estrutura.

Além da admitância elétrica (I/V), sua inversa, a impedância elétrica (V/I), também pode ser utilizada para o monitoramento de integridade estrutural. Muitos são os trabalhos utilizando o método da impedância [2]. Park et. al. [34] fazem uma ampla revisão do método de impedância utilizando material piezoelétrico para o monitoramento da integridade estrutural. Eles relacionam e explicitam vários parâmetros envolvidos na análise da impedância como faixa de frequência, regiões de sensoramento, componentes de Hardware, processamento do sinal medido através dos índices, etc. Citam experimentos utilizando a impedância e realizam uma comparação com outros métodos. Finalizam o trabalho relatando os problemas futuros que devem ser enfrentados pelos pesquisadores que pretendem utilizar essa técnica.

Um dos problemas que ainda não foi completamente solucionado é a determinação da faixa de frequência que se deve utilizar quando se pretende aplicar essa técnica. A determinação dessa faixa costuma ser feita através de tentativa e erro, pois cada estrutura apresenta suas particularidades que influenciam na escolha. Entretanto, estudos têm demonstrado [28] que as faixas de frequências com maior densidade de modos são mais favoráveis e geralmente contém mais informações sobre as condições estruturais. Faixas de frequências com múltiplos picos, de 20 a 30 picos, são geralmente escolhidas. Faixa de frequência maior do que 200 kHz são mais favoráveis ao sensoramento local, enquanto que frequências abaixo de 70 kHz conseguem abranger uma área maior.

Baptista e Filho [3] propuseram um procedimento para determinar as faixas de frequência em que os transdutores piezoelétricos são mais sensíveis para detecção de danos. Os testes foram realizados com quatro tipos de estruturas de alumínio de tamanhos/espessuras diferentes. Os resultados mostraram que a magnitude do índice utilizado está relacionada com a sensibilidade do transdutor PZT. Os índices são maiores nas frequências em torno dos pontos de ótimo de sensibilidade do transdutor e quase zero em torno do ponto de sensibilidade mínima. Apesar da escolha da faixa de frequência correta para a detecção depender das propriedades da estrutura e do tipo de dano, os resultados mostraram que a metodologia proposta pode ser muito útil como referência para seleção.

1.2.3. Modelos de delaminação

A demanda por estruturas cada vez mais complexas tem exigido dos materiais empregados uma combinação de propriedades mecânicas que dificilmente seria encontrada em um único material. Essa combinação pode ser obtida através dos materiais compósitos que

em consequência da disposição de suas fibras fornecem à estrutura maior força e rigidez, e são mais resistentes a danos que se propagam através da espessura. No entanto, nas camadas da estrutura compósita, o dano pode facilmente se propagar paralelamente a superfície das paredes, geralmente na interface entre as camadas. Isso os torna mais suscetíveis a danos como a delaminação (descolamento entre camadas vizinhas em estruturas laminadas), que devido as suas características, comparado a outros tipos de danos, apresenta o maior crescimento dimensional. O tamanho da delaminação e sua taxa de crescimento têm grande influência na perda residual de resistência em estruturas compósitas, embora a taxa de crescimento não seja um parâmetro frequentemente estudado [31].

A delaminação pode ser provocada por defeitos na fabricação, como imperfeições na união das camadas, e/ou defeitos de uso, como excentricidades no carregamento, impactos a baixa velocidade, fadiga, etc. Sua detecção tem recebido considerável atenção das comunidades científicas por ser um dano interno a estrutura e só ser percebido, quando percebido, em estágios muito avançados podendo causar danos catastróficos. A delaminação causa mudanças locais na rigidez, amortecimento, e/ou massa, alterando as características dinâmicas da estrutura como frequência, modos de vibrar e amortecimento modal. Qualquer tentativa que seja feita no sentido de se entender o comportamento da delaminação deve passar necessariamente pelo estudo da resistência interlaminar de estruturas compósitas, uma vez que a origem e propagação da delaminação estão intrinsecamente relacionadas com as forças de interação existente entre as camadas.

A orientação das fibras na estrutura também pode ter um efeito significativo na delaminação. Os estudos utilizando materiais compósitos, geralmente são realizados com estruturas em que as fibras encontram-se numa única direção, o que os tornam não representativos, uma vez que os resultados encontrados não representam precisamente o crescimento real do dano ao longo das interfaces heterogêneas. Além disso, fibras em uma única direção podem ocasionar diferenças na elasticidade, pois a ausência de fibras em outra direção pode resultar em maior quantidade de resina entre as fibras [31].

O desenvolvimento de experimentos para detectar delaminação em estruturas compósitas baseados em modelos de elementos finitos tem sido realizado com frequência em estudos de SHM, tais modelos tornam-se uma ferramenta útil de análise após serem validados por resultados experimentais. Bois e Hochard [8] através de simulações e resultados experimentais, utilizando o método da impedância para detectar delaminações em estruturas compósitas, comprovaram a possibilidade de definir o tamanho e a posição da delaminação com um modelo tridimensional utilizando pastilhas piezoelétricas.

Modelos analíticos também têm sido desenvolvidos para verificar a presença, crescimento e localização da delaminação. Tan e Tong [45] desenvolveram um modelo analítico para viga em balanço constituída por material piezoelétrico, nas suas superfícies, e material compósito, em seu núcleo, para detectar a presença, o tamanho e a localização axial da delaminação presente no interior da viga constituída por material compósito através da variação das três primeiras frequências naturais e da leitura de carga nos sensores. Foram realizados vários testes com diferentes tipos de delaminação e verificou-se que o aumento da delaminação causa diminuição da frequência natural e que o efeito da delaminação se torna mais visível em frequências mais elevadas, também se verificou que a variação da delaminação através da espessura altera o resultado, medido na pastilha superior, quando a delaminação está acima do plano médio, entretanto quando a delaminação está abaixo do plano médio os resultados são semelhantes ao plano médio.

Estudos comparativos entre vários métodos que utilizam o material piezoelétrico para detectar a delaminação em estruturas compósitos também têm sido realizados, tais métodos compreendem os baseados em vibrações [14,51,54], propagação de ondas [10,23,28] e impedância elétrica [16,50]. Brunner et. al. [9] realizaram um estudo para avaliar o desempenho das pastilhas piezoelétricas em detectar a delaminação em vigas compósitas de fibra de vidro/epoxy. Eles analisaram a capacidade de três tipos de técnicas de monitoramento - acústica ultrassônica, impedância elétrica e medida da reposta no tempo - em detectar o dano causado pela delaminação, utilizando vários tamanhos e posições de delaminação na viga compósita.

Na literatura, é possível encontrar alguns modelos para representar a delaminação em estruturas compósitas, tais modelos podem ser divididos em três categorias segundo a quantidade de material empregada. A primeira diz respeito a modelos em que uma quantidade de material alheio à estrutura é acrescentada em pontos específicos com objetivo de alterar suas propriedades, simulando a presença da delaminação, tal metodologia é empregada quando o valor dos materiais utilizados é elevado e a repetição do experimento com descarte do material é necessária. Na segunda, ocorre uma subtração de material do modelo em quantidades equivalentes ao espaço que supostamente seria formado pela delaminação. Na última não ocorre nem acréscimo nem subtração de material da estrutura, deixando-se apenas de unir o espaço entre as camadas onde supostamente existiria a delaminação, na prática isso pode ser difícil, pois em alguns materiais as camadas já se apresentam unidas.

Como este trabalho envolve apenas simulações em software de elementos finitos, objetivando a seleção dos melhores casos, espera-se que os custos pela repetição de futuros

experimentos sejam evitados. Assim a escolha do modelo de delaminação que será utilizado envolverá somente os últimos dois casos.

Testes foram realizados retirando-se material da estrutura em forma de elipse, figura 2, mas os resultados não se mostraram realistas, pois na prática não ocorre nenhuma perda de material da estrutura devido à delaminação e as malhas em torno dessas delaminações tornaram-se muito difíceis de serem controladas, acrescentado mais um fator de diferenciação entre os casos em estudo, a ponto de serem confundidas com a presença da própria delaminação. Assim optou-se por utilizar o último modelo por ser o mais realista e não apresentar os mesmos problemas citados anteriormente.

Figura 2: Malha de elementos finitos aplicada ao modelo da estrutura para uma delaminação de 60 mm, construída a partir da subtração de material da primeira e segunda camada em formato de uma elipse.

1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver, com ajuda de um modelo de elementos finitos ANSYS em 2D, uma análise de diferentes técnicas para detecção da posição e tamanho da delaminação em estruturas compósitas usando pastilhas piezoelétricas. Várias métricas e técnicas são avaliadas em termos de sua capacidade em identificar, com relativa acurácia, a presença, localização e severidade do dano.

Capítulo 2

Modelagem

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para a modelagem da estrutura compósita laminada, com e sem delaminação, com pastilhas piezoelétricas e para a extração das respostas em frequência utilizando o software comercial de elementos finitos ANSYS.

2.1. Características do Modelo

A escolha das características da estrutura foi feita com objetivo de simular condições reais de uso, principalmente em estruturas aeronáuticas, para que os resultados obtidos sejam futuramente testados em casos práticos.

O modelo de estrutura analisado será a viga em balanço, 2-D, engastada em sua extremidade esquerda. Esta viga será composta por seis camadas do mesmo material compósito, Carbono Epoxy (AS4/3501-6), que se alternarão em relação à direção das fibras, direções X e Z. Esta disposição confere a estrutura melhor desempenho, entretanto faz com a estrutura esteja sujeita a defeitos característicos como o descolamento entre as camadas, representado pela delaminação, alvo desse estudo de SHM.

Outra característica do modelo é a presença de duas pastilhas piezoelétricas, PZT-5H, posicionadas na superfície superior da viga, separadas por uma distância de 100 mm. A utilização de duas pastilhas piezoelétricas permite comparar os sinais medidos por ambas quando se está analisando um mesmo defeito, possibilitando assim, estimar a posição relativa do dano, pois quando o dano está localizado nas proximidades de uma das pastilhas espera-se que a leitura do seu sinal seja mais afetada por aquele dano do que o sinal medido pela outra pastilha. É importante observar que a precisão na identificação da posição do defeito está limitada ao número de pastilhas e ao conhecimento prévio da posição destas em relação à viga, o ideal seria a utilização de uma rede de sensores/atuadores distribuídos por toda viga, entretanto, isso implicaria custos computacionais excessivos que de uma maneira geral impactariam pouco no objetivo desse trabalho que é a identificação das melhores técnicas de monitoramento da integridade estrutural partindo-se de posições pré-definidas para os defeitos. As propriedades dos materiais utilizados podem ser vistas no ANEXO I.

As características geométricas do modelo são apresentadas na figura 3, tais dimensões levam em consideração a construção futura de ensaios experimentais que possibilitarão a validação dos resultados encontrados.

Figura 3: Representação esquemática das propriedades geométricas do modelo.

Para realizar o estudo das técnicas de monitoramento propostas nesse trabalho será necessário comparar os modelos da estrutura com e sem defeito, através de índices calculados a partir dos dados extraídos do ANSYS. O defeito analisado será a delaminação por ser o dano mais comum em estruturas laminadas e de difícil detecção pelos métodos tradicionais de SHM. Com base nisto e com intuito de selecionar os melhores índices, para estrutura com defeito, serão definidos três tamanhos de delaminação, 10, 20 e 30 mm, que ocorrerão entre as duas camadas imediatamente abaixo das pastilhas, esta variação no tamanho do dano tem a finalidade de testar a sensibilidade do índice ao crescimento da falha. Além da variação do tamanho, também serão variadas as posições do centro da delaminação, entre a distância que separa as duas pastilhas, nas posições de 60, 85 e 110 mm do engaste. O objetivo desta variação é testar a habilidade dos diferentes índices em identificar a posição do dano em relação às pastilhas, através da comparação do sinal medido por ambas. Esses são alguns dos parâmetros de análise considerados essenciais para testar o desempenho dos índices, entretanto, outras análises também poderiam ter sido feitas como, por exemplo, variar a delaminação entre as camadas, para testar a sensibilidade do índice quando o dano se afasta da superfície da estrutura.

2.2. Modelagem em Ansys

O processo de modelagem seguirá as etapas abaixo:

1. Definição dos elementos e propriedades dos materiais;
2. Criação geométrica do modelo;
3. Atribuição das propriedades dos materiais ao modelo e criação da malha de elementos finitos;
4. Aplicação das condições de contorno;
5. Análise modal e harmônica.

As etapas 4 e 5 são interdependentes, isto é, as condições de contorno devem estar em conformidade com o tipo de análise que se deseja realizar. O diagrama representando essas etapas pode ser visto abaixo:

Figura 4: Diagrama das etapas do processo de modelagem utilizando ANSYS.

Para que o menu do ANSYS contenha todas as funcionalidades que serão empregadas na modelagem, antes de iniciá-la é preciso definir o tipo de estudo que se pretende realizar, isso pode ser feito em preferências selecionando-se as opções Estrutural e Elétrica. As etapas 1, 2 e 3 serão realizadas através dos comandos presentes no menu Pré-Processamento (*Preprocessor*), a etapa 4 pode ser realizada utilizando o comando *LOADS* presente tanto no

menu Pré-Processamento como no menu Solução (*Solution*) e a etapa 5 utilizará os menus Solução e de Pós-Processamento (*General Postproc* e *TimeHist Postpro*).

Definido o tipo de estudo que será realizado, inicia-se a primeira etapa da modelagem selecionando os elementos finitos a serem utilizados. Como o modelo será 2 D, dois tipos de elementos planos serão selecionados: elemento 1 - *PLANE82*, para as camadas da viga, e elemento 2 - *PLANE223*, para as pastilhas piezoelétricas. O elemento *PLANE82* possui 8 nós com 2 graus de liberdade por nó (translação nas direções X e Y), tolera formas irregulares sem perder muita precisão. O elemento *PLANE223* pode ser definido como material piezoelétrico, possuindo 8 nós com até 4 graus de liberdade por nó, sendo que no caso do material piezoelétrico serão três 3 graus de liberdade por nó (translação nas direções X e Y e tensão elétrica), o comportamento estrutural é linear elástico. Em análises piezoelétricas, o carregamento pode ser definido em termos de carga elétrica ou densidade de carga elétrica aplicada. Os elementos têm como restrição a necessidade de estar no plano global XY para realização da modelagem. A representação geométrica dos elementos pode ser vista na figura 5.

Figura 5: Representação do elemento *PLANE82* e *PLANE223* e posição dos nós, nas versões quadrangular e triangular, conforme convenção adotada pelo ANSYS [38].

Selecionados os elementos, eles precisam ser configurados para as condições da modelagem. Em opções, o elemento *PLANE82* deve ser ajustado para estado plano de tensão com espessura e o elemento *PLANE223* somente para estado plano de tensão, já que a espessura é unitária por definição (não podendo ser alterada), nesse momento o elemento também deve ser definido como piezoelétrico. A espessura do elemento que irá compor a viga

pode ser adicionada definindo-se uma Constante Real (*Real Constants*) para o elemento *PLANE82*, *thickness*=25 mm. Esta constante será a Constante Real 1.

O próximo passo da etapa 1 é definir as propriedades dos materiais empregados. É importante observar que ANSYS adota uma disposição diferente para as propriedades de materiais piezoelétricos, em comparação ao padrão estabelecido na norma da IEEE [19], implicando inversões dos elementos das matrizes das constantes piezoelétricas, conforme se observa abaixo através das equações (3) e (4) [38].

$$[c] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy & yz & xz \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & & & & & \\ c_{21} & c_{22} & & & & \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & & & \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & & \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad [e] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

$$\text{ANSYS}[c]^E = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy & yz & xz \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & & & & & \\ c_{21} & c_{22} & & & & \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & & & \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{66} & & \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{46} & c_{44} & \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{56} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \text{ANSYS}[e] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

A definição dos materiais empregados será feita em Propriedade dos Materiais (*Material Props*). Serão definidos três tipos de materiais, apesar de serem utilizados de fato somente dois, PZT-5H e AS4/3501-6. Isso ocorre porque as camadas do material Carbono Epoxy, utilizadas na viga, alternam-se em relação à direção das fibras. Como o modelo deve ser construído no plano XY (requerimento do ANSYS para os elementos *PLANE82* e *PLANE223*), as propriedades dos materiais transversalmente isotrópicos (PZT-5H e AS4/3501-6) fornecidas pelo fabricante (ANEXO I) devem ser adaptadas conforme polarização e direção das fibras. Para o material piezoelétrico, que se encontra polarizado na direção Z, será necessário rotacioná-lo para direção Y, e para o material Carbono Epoxy, que também será utilizado com as fibras na direção X conforme definido no ANEXO I, será necessário rotacioná-lo para direção Z. Como o ANSYS só aceita elementos planos normais a Z, o material com fibras na direção Z será definido como isotrópico, ao passo que os outros dois serão definidos como ortotrópicos. Assim, o material 1 será o material piezoelétrico

(PZT-5H), o material 2 será o material compósito Carbono Epoxy com fibras em X (AS4/3501-6 ortotrópico) e o material 3 será material compósito Carbono Epoxy com fibras em Z (AS4/3501-6 isotrópico).

Especificados os materiais e suas propriedades, passa-se a etapa 2 que é a construção geométrica do modelo com as dimensões especificadas na figura 3. O modelo será criado através de áreas retangulares indicando-se para construção de cada área suas coordenadas iniciais X-Y, comprimento e altura. Para facilitar no preenchimento dos valores serão definidos dois parâmetros escalares $hc=0,5 \text{ mm}$ e $xc=300 \text{ mm}$, que representam a espessura das camadas e o comprimento total da viga, respectivamente. Para realizar a comparação entre a estrutura com e sem defeito, um modelo de referência, sem nenhum tipo de defeito, será criado e utilizado na comparação com os outros casos com defeito. A diferença entre o modelo que será utilizado como padrão, dos outros modelos com delaminação, é a uniformidade das duas primeiras camadas logo abaixo das pastilhas. Para representar a delaminação as duas primeiras camadas serão divididas em três partes, representadas por três áreas de comprimentos que se ajustam ao tamanho e a posição da delaminação. Por exemplo, para uma delaminação de 10 mm, com seu centro posicionado a 60 mm do engaste, as três áreas, das duas primeiras camadas, possuíram os comprimentos de 55 mm, 10 mm e 235 mm, respectivamente, diferentemente do modelo padrão que possuirá essas duas camadas contínuas. A figura 6 mostra o modelo da estrutura com delaminação construído a partir das áreas retangulares.

Como o modelo da estrutura com delaminação é semelhante para todos os casos que serão estudados, alterando-se apenas tamanho e posição da delaminação, somente um caso será apresentado: delaminação de 10 mm com seu centro posicionado a 60 mm do engaste.

Figura 6: Modelo da estrutura com delaminação de 10 mm com seu centro posicionado a 60 mm do engaste, construído a partir de áreas retangulares.

Criadas as áreas, o próximo passo será integrá-las numa única estrutura, colando-as, isso será feito através do comando *GLUE*. Para o modelo padrão basta selecionar todas as áreas e colá-las através do procedimento citado; já para o modelo com delaminação as áreas precisam ser selecionadas, de forma que as áreas A5 e A6, especificadas na figura 6, permaneçam descoladas simulando a delaminação. Este processo mostrou-se trabalhoso visto que dependendo da ordem em que as áreas são coladas esse comportamento não é obtido. Assim, a ordem de colagem das áreas que se mostrou adequada foi: unir primeiro as áreas A4, A6, A8, A9, A10, A11 e A12, formando-se um bloco inferior; depois unir as áreas A1, A2, A3, A5, A7, formando-se um bloco superior; e finalmente unir os dois blocos através das áreas A3 e A4 e das áreas A7 e A8. Nota-se que esse procedimento só manteve as áreas A5 e A6 descoladas, o que era desejado.

Iniciando a etapa 3, o primeiro passo será relacionar o modelo da estrutura com as propriedades dos materiais e os elementos finitos que o compõem, e em seguida criar a malha de elementos finitos. Tanto a atribuição das propriedades como a criação da malha serão feitas através da ferramenta *MeshTool* que se encontra no comando *Meshing*.

A atribuição das propriedades dos materiais e dos elementos ao modelo será feita através das áreas que compõem a estrutura, conforme a figura 6. De acordo com o exposto na etapa 1 têm-se dois elementos (1- *PLANE82* e 2- *PLANE223*), três materiais (1- *PZT-5H*, 2- *AS4/3501-6* ortotrópico e 3- *AS4/3501-6* isotrópico) e uma constante real (1- *thickness*). Assim, serão atribuídas às áreas A1 e A2, que representam as pastilhas piezoelétricas, o material **1** e o elemento **2**; às áreas A4, A6, A8 e A11, que representam as camadas da viga com fibras em Z, o material **3**, o elemento **1** e a Const. Real **1**; e às áreas A3, A5, A7, A9, A10 e A12, que representam as camadas da viga com fibras em X, o material **2**, o elemento **1** e a Const. Real **1**. Na figura 7 é possível visualizar as estruturas que compõem o modelo de acordo suas propriedades e elementos.

Figura 7: Representação das estruturas que compõem o modelo de acordo com suas propriedades e elementos diferenciadas pelas cores roxa, azul e vermelha.

Associadas as propriedades e os elementos ao modelo, o próximo passo será discretizá-lo através da criação da malha de elementos finitos. Primeiramente, será definido o comprimento global dos elementos igual a 1 mm, este comprimento será aplicado a todos os elementos da estrutura. Em seguida, será feito um refinamento da malha nas regiões mais sensíveis do modelo, que são: união pastilha-estrutura (região onde ocorre a transição do elemento *PLANE223* para *PLANE82*) e camadas onde serão simuladas as delaminações. Para refinar essas regiões, as linhas verticais das pastilhas e das duas primeiras camadas logo abaixo das mesmas serão divididas em duas, isso proporcionará um refinamento dos elementos em Y, aumentando o número de elementos nas regiões sensíveis. Assim, os elementos empregados terão as seguintes dimensões: para as pastilhas piezoelétricas e as duas primeiras camadas 1 x 0,25 mm e para as demais camadas 1 x 0,5 mm. A escolha dessa configuração para malha foi o resultado de inúmeros testes realizados variando-se o comprimento global dos elementos ou utilizando a função *Smart Size* com diversos tipos de refinamento, os resultados encontrados nos casos mais refinados foram semelhantes ao da malha empregada, com a diferença de exigirem maior tempo de processamento. Para finalizar a criação da malha, é necessário definir a forma dos elementos que serão empregados, nesse estudo serão elementos quadrangulares. A vantagem de criar a mesma malha regular para todos os casos é minimizar sua influência na comparação dos resultados. O modelo da estrutura com a malha pode ser visto na figura 8.

Figura 8: Representação da malha de Elementos Finitos criada a partir de elementos quadrangulares de comprimento 1 mm, com refinamento em Y nas pastilhas piezoelétricas e nas duas primeiras camadas onde encontra-se a delaminação.

Apesar de todos os componentes estruturais pertencentes ao modelo já terem sido coladas através do comando *GLUE*, será utilizado o comando *MERGE* nas linhas que unem as pastilhas ao resto da estrutura, para garantir o efetivo acoplamento entre os dois tipos de elementos empregados, *PLANE223* e *PLANE82*. Tal comando tem a função de unir os elementos que se encontram dentro da área de tolerância, definida pelo usuário, transformando os nós envolvidos em um único nó e acoplando os graus de liberdade em comum, neste caso, as translações nas direções X e Y. Com auxílio do comando *Select Entities* serão selecionados os nós pertencentes às linhas horizontais inferiores das duas pastilhas piezoelétricas, que se encontram alinhados com os nós da primeira camada da viga. O processo de seleção consiste em primeiro selecionar as linhas e depois os nós a elas associados. Depois de selecionados os nós, será aplicado o comando *MERGE*, e para garantir que só os nós que se encontram sobrepostos sejam acoplados, será aplicada uma tolerância de 0,1mm. É importante observar que ao final de todo processo de seleção é preciso selecionar novamente todos os elementos da estrutura, para que as operações seguintes não sejam atribuídas somente a aqueles elementos anteriormente selecionados. Na figura 9, em vermelho, é possível visualizar os nós que foram acoplados, para uma das pastilhas.

Figura 9: Nós que unem a primeira pastilha piezoelétrica ao resto da estrutura, acoplados através do comando MERGE.

Para simular o efeito dos eletrodos, que distribuem uniformemente as cargas geradas ou aplicadas nas extremidades das pastilhas piezoelétricas, uma espécie de equipotencial será feito nos nós da superfície superior das pastilhas, através do comando *Couple DOFs*. Da mesma forma que os nós foram selecionados para serem acoplados, utilizando o comando *Select Entities*, eles também serão selecionados para fazer o equipotencial. Entretanto aqui um cuidado especial deve ser tomado, o equipotencial deve ser feito pastilha a pastilha, para que os nós de uma pastilha não sejam acidentalmente concatenados com os da outra, formando um único equipotencial. Cada equipotencial receberá um nome, que no caso será Volt, e uma numeração, 1 e 2, que os distinguirão. Tal procedimento pode ser visualizado na figura 10.

Figura 10: Representação do equipotencial realizado na superfície superior das pastilhas piezoelétricas utilizando o comando Couple DOFs.

Passando-se para etapa 4 serão aplicadas as condições de contorno elétrica e estrutural. Como as pastilhas piezoelétricas trabalharão em circuito fechado e aberto, as duas condições devem ser modeladas no ANSYS. Para circuito aberto, os nós da base serão aterrados, criando um valor de referência para se medir a tensão elétrica, e os da superfície serão mantidos sem nenhuma condição de contorno elétrica, apenas respeitando-se o equipotencial; já para

circuito fechado os nós das duas superfícies (superior e inferior) serão aterrados, simulando uma espécie de curto circuito em que as cargas geradas nas superfícies das pastilhas se compensarão. O aterramento dos nós das superfícies das pastilhas impõe que o potencial seja nulo em qualquer estado de deformação do material. Isso pode ser feito através do comando *LOADS* selecionando a condição de contorno elétrica voltagem aplicada aos nós, aqui também será necessário a seleção prévia dos nós por meio do comando *Select Entities*, e definindo uma constante elétrica *VOLT* a qual se atribuirá o valor zero.

A condição de contorno estrutural diz respeito ao engaste e será aplicada aos nós pertencentes às linhas verticais da extremidade esquerda da viga. Usando o comando *LOADS*, agora para os deslocamentos estruturais, serão selecionados os nós associados ao engaste e lhes serão restringidos as translações em X e Y, através da atribuição do valor zero para tais deslocamentos. Os resultados da aplicação das condições de contorno podem ser vistos nas figuras 11 e 12.

Figura 11: Aplicação das condições de contorno elétricas, circuito fechado para duas pastilhas piezoelétricas, e estruturais, restrições aos deslocamentos X e Y dos nós pertencentes às linhas que se encontram a extremidade esquerda da viga.

Figura 12: Representação das condições de contorno elétricas e estruturais aplicadas aos nós. É possível visualizar na pastilha piezoelétrica a aplicação da condição de contorno elétrica, circuito fechado, juntamente com o equipotencial.

As análises que serão feitas a seguir, etapa 5, fornecerão os dados necessários para realizar a comparação dos índices associados a alguma técnica de monitoramento, possibilitando identificar a melhor técnica ou conjunto das melhores técnicas de Monitoramento da Integridade Estrutural, para o caso em estudo, juntamente com os parâmetros ideais para obtenção desses resultados. Tais análises serão configuradas no menu Solução (*Solution*).

a) Análise modal

A análise modal será realizada com intuito de obter as cem primeiras frequências naturais da estrutura para os casos com e sem defeito. No processo de aquisição das frequências naturais devem ser levados em consideração os três tipos de configurações elétricas para as quais as pastilhas piezoelétricas serão ajustadas, e que serão alvo de posterior análise através dos índices: i) as duas pastilhas em circuito fechado; ii) primeira pastilha em circuito aberto e segunda em circuito fechado; e iii) primeira pastilha em circuito fechado e segunda em circuito aberto. Assim, para cada conjunto de análises modais, variando-se tamanho e posição da delaminação, será configurado um tipo diferente de condições de contorno elétrica para as pastilhas, atendendo as configurações elétricas listadas acima.

Para iniciar a análise modal, no menu Solução em Tipos de Análise será necessário criar uma Nova Análise e defini-la como modal. Em seguida em Opções de Análise é

possível configurá-la para retornar os resultados desejados. Os parâmetros que serão ajustados são: método de extração dos modos, sendo que o ANSYS possui diferentes tipos de método de extração, mas aqui será utilizado o *Block Lanczos* por ser o mais rápido no cálculo dos autovalores e autovetores quando se está analisando uma faixa de frequência específica; e o número de modos que serão extraídos, que será ajustado para os 100 primeiros modos de vibrar.

Configurada a análise, o próximo passo será calcular a solução através do comando *Current LS*. O status da solução pode ser visto na figura 13.

Figura 13: Status da Solução onde são apresentados todos os parâmetros utilizados no cálculo da solução.

No menu Pós-Processamento é possível extrair os dados que foram calculados no processo anterior, que inclui as 100 primeiras frequências modais, e visualizar o comportamento da estrutura nos diversos modos de vibrar. Na figura 14 é possível visualizar o comportamento da estrutura com delaminação para alguns modos de vibrar. Observa-se da figura 14(b) que dependendo do modo em que a estrutura é excitada a abertura da delaminação é maior ou menor.

(a)

Figura 14: Representação de alguns modos de vibrar da estrutura configurada para uma delaminação de 10 mm, posicionada a 60 mm do engaste e com condição de contorno elétrica de circuito fechado para os dois PZTs: (a) 14 primeiros modos de vibrar da viga engastada livre e (b) zoom para os 10, 20, 30, 40 e 50º modos de vibrar com destaque para a delaminação.

Figura 14 (cont.): Representação de alguns modos de vibrar da estrutura configurada para uma delaminação de 10 mm, posicionada a 60 mm do engaste e com condição de contorno elétrica de circuito fechado para os dois PZTs: (a) 14 primeiros modos de vibrar da viga engastada livre e (b) zoom para os 10, 20, 30, 40 e 50º modos de vibrar com destaque para a delaminação.

b) Análise Harmônica

Através da análise harmônica será possível identificar o dano, estudar seu crescimento e estimar sua posição. Apesar dessas três constatações também serem possíveis para análise modal, a análise harmônica é mais indicada para o estudo da posição, pois, para esta, a leitura da resposta é feita localmente em cada sensor permitindo a comparação. A presença de duas pastilhas piezoelétricas na mesma estrutura permite estimar a posição relativa do dano através da comparação do sinal medido por elas, uma vez que quanto mais próximo o dano está da pastilha maior deveria ser sua influência na resposta medida. A análise será feita da seguinte maneira, para uma mesma posição e tamanho de dano, será medido o sinal gerado pelos dois sensores, um de cada vez, sendo que a pastilha em análise será ao mesmo tempo atuador e sensor ao passo que a outra será mantida em circuito aberto. Esse processo se repetirá para as três posições e para os três tamanhos de delaminação. O sinal medido nas pastilhas será a tensão elétrica gerada no eletrodo e a entrada aplicada será carga elétrica.

Para realizar a análise harmônica é necessário aplicar uma força externa de excitação ao modelo, esta entrada no sistema será feita através da própria pastilha piezoelétrica através da aplicação de cargas na superfície do eletrodo. Antes, é preciso garantir que as duas pastilhas estejam em circuito aberto, pois para que a pastilha funcione como atuador e sensor ela não pode estar em circuito fechado. Isso pode ser feito selecionando os nós da superfície superior de cada pastilha, através do comando *Select Entities* (Seleção de Entidades), e em seguida utilizando o comando *LOADS*, deletar as condições de contorno elétricas, que possam existir de análises anteriores, das superfícies dos eletrodos. Para aplicar a carga elétrica de excitação na pastilha que funcionará como atuador, e, posteriormente, como sensor durante a leitura do sinal, será preciso selecionar os nós da superfície de pastilha através do comando *Select Entities*, em seguida deve ser executada a sequência de comandos *Loads->Define Loads->Apply->Electric->Excitation->Charge->On Nodes* para aplicar carga elétrica nos nós selecionados. A carga aplicada terá valor unitário, para padronizar os resultados, e sinal negativo, para adequar as condições de polarização das pastilhas às definições do ANSYS. O resultado desse processo pode ser visto na figura 15, em que a primeira pastilha funciona como atuador/sensor.

Figura 15: Representação da estrutura aplicando-se uma excitação de carga elétrica na superfície da primeira pastilha piezoelétrica e ajustando-se as condições de contorno elétricas da segunda pastilha para circuito aberto.

Para realizar a análise harmônica, no menu “Solução” em “Tipos de Análise” será necessário criar uma Nova Análise e defini-la como harmônica. Em seguida em “Opções de Análise” é possível ajustar a análise harmônica, adequando-a ao estudo. O método empregado na solução será *Full*, outra opção seria utilizar a redução modal, menos custosa em termos de processamento, mas que ocasionaria maiores imprecisões ao modelo, indesejáveis no estudo de SHM, uma vez que em muitos casos as diferenças entre um estado e outro da estrutura são sutis, principalmente quando se está analisando defeitos muito pequenos. A outra configuração a ser definida diz respeito à forma como a resposta da estrutura será exibida no final da análise, no caso serão parte real e parte imaginária da resposta em frequência complexa.

Dentro do menu Solução será selecionado o comando *Load Step Opts* para configurar os parâmetros da Análise Harmônica, como: faixa de frequência que será estudada e exibida, tipo de entrada e amortecimento da estrutura. Para que todo o intervalo de frequência seja exibido no final da análise, em Controle de Exibição dos Resultados (*Solution Printout Controls*) a opção *Every Substeps* deve ser selecionada.

A faixa de frequência analisada irá de 0 a 50 kHz, em intervalos (*Substeps*) de 10 em 10 Hz, dividindo a faixa em 5000 Substeps. Como o ANSYS possui o padrão de 1000 Substeps, será necessário aumentar o número de Substeps através do comando **/config, NRES, 5001** que deve ser inserido na barra de comandos do ANSYS logo após o programa ser inicializado. Em *Time/frequenc* selecionando *Freq and Subtps* é possível definir a faixa de frequência harmônica de 0-50000, o número de Substeps 5000 e o tipo

de entrada Degrau; e selecionando *Damping* é possível definir um amortecimento modal para a estrutura igual a 0,5%.

Definidas as características da análise pode-se calcular a resposta através do comando *Solve->Current LS*. O status da solução pode ser visto na figura 16, na qual é possível observar todas as configurações utilizadas para o cálculo da resposta harmônica.

Figura 16: Status da Solução onde são apresentadas todas as configurações utilizadas para calcular a resposta harmônica.

O modelo da estrutura após o cálculo da solução pode ser visto na figura 17, na qual estão representadas todas as forças que agem sobre o sistema juntamente com as condições de contorno empregadas.

Figura 17: Modelo da estrutura após o cálculo da resposta harmônica, com destaque para forças e condições de contorno que agem sobre as duas pastilhas piezoelétricas.

A extração dos resultados será feita no menu TimeHist PostPro dentro da aplicativo Time History Variables. Por padrão, a resposta aparecerá no domínio do tempo, ela deve ser alterada para o domínio da frequência. Para realizar a medição da voltagem em um dos nós presentes no eletrodo da pastilha piezoelétrica, que também está sendo utilizada como atuador, será criada uma variável VOLT em potencial elétrico dentro da solução nodal por graus de liberdade, em seguida se selecionará qualquer um dos nós do eletrodo.

Da resposta em frequência da elastância (Volt/Coulomb), as partes real e imaginária e a amplitude podem ser extraídas do arquivo texto gerado pelo ANSYS através de *List Data*.

2.3. Formulação teórica para análise harmônica

A equação do movimento ajustada para o método de Elementos Finitos e para o acoplamento eletromecânico entre uma pastilha piezoelétrica e a estrutura pode ser escrita através da expressão:

$$\overline{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{K}}\mathbf{q} = \overline{\mathbf{F}} \quad (5)$$

onde $\overline{\mathbf{M}}$ é a matriz de massa do sistema, $\overline{\mathbf{K}}$ é a matriz de rigidez do sistema, $\overline{\mathbf{D}}$ é a matriz de amortecimento definida a posteriori, $\overline{\mathbf{F}}$ é o vetor de forças externas aplicadas ao sistema e $\mathbf{q}$ é vetor que representa os graus de liberdade do sistema.

Os graus de liberdade constantes do vetor $\mathbf{q}$ são aqueles associados aos elementos selecionados na modelagem, *PLANE82* e *PLANE223*, ou seja, graus de liberdade que representam deslocamentos nodais, u , e um grau de liberdade que representa a tensão elétrica na pastilha piezoelétrica, V_p , assim a equação (5) pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{V}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{V}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \overline{\mathbf{K}}_{u\varphi} \\ \overline{\mathbf{K}}_{\varphi u} & \overline{\mathbf{K}}_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ Q_p \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde $\mathbf{K}_{uu}$ e $\overline{\mathbf{K}}_{u\varphi}$ são as matrizes de rigidez mecânica (elástica) e eletromecânica (piezoelétrica), respectivamente, $\overline{\mathbf{K}}_{\varphi\varphi}$ é a rigidez elétrica (dielétrica), $\mathbf{M}$ é a matriz de massa, $\mathbf{D}$ é a matriz de amortecimento (definida a posteriori), $\mathbf{F}$ é o vetor de forças nodais e Q_p é a carga elétrica aplicada na pastilha piezoelétrica.

Para o cálculo das funções de resposta em frequência, através da aplicação de carga elétrica na superfície da pastilha e medição de tensão elétrica induzida na mesma, será necessário supor um forçamento elétrico harmônico, com $\mathbf{F} = 0$, portanto:

$$Q_p = \tilde{Q}_p e^{i\omega t}; \mathbf{u} = \tilde{\mathbf{u}} e^{i\omega t}; V_p = \tilde{V}_p e^{i\omega t} \quad (7)$$

Substituindo a equação (7) em (6) obtêm-se as seguintes expressões:

$$\overline{\mathbf{K}}_{\varphi\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}} + \overline{K}_{\varphi\varphi}\tilde{V}_p = \tilde{Q}_p \quad (8)$$

$$(-\omega^2\mathbf{M} + i\omega\mathbf{D} + \mathbf{K}_{\mathbf{uu}})\tilde{\mathbf{u}} + \overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{u}\varphi}\tilde{V}_p = 0 \quad (9)$$

Isolando $\tilde{\mathbf{u}}$ na equação (9), tem-se:

$$\tilde{\mathbf{u}} = (\omega^2\mathbf{M} - i\omega\mathbf{D} - \mathbf{K}_{\mathbf{uu}})^{-1}\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{u}\varphi}\tilde{V}_p \quad (10)$$

Encontrada uma expressão para $\tilde{\mathbf{u}}$, equação (10), é possível substituí-la na equação (8):

$$\left[\overline{\mathbf{K}}_{\varphi\mathbf{u}}(\omega^2\mathbf{M} - i\omega\mathbf{D} - \mathbf{K}_{\mathbf{uu}})^{-1}\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{u}\varphi} + \overline{K}_{\varphi\varphi}\right]\tilde{V}_p = \tilde{Q}_p \quad (11)$$

Reordenando os elementos da equação (11), obtém-se a fórmula para Função de Resposta em Frequência da Elastância $(\tilde{V}_p/\tilde{Q}_p)$, para uma pastilha de cada vez, abaixo:

$$E(\omega) = \frac{\tilde{V}_p}{\tilde{Q}_p} = \frac{1}{\left[\overline{\mathbf{K}}_{\varphi\mathbf{u}}(\omega^2\mathbf{M} - i\omega\mathbf{D} - \mathbf{K}_{\mathbf{uu}})^{-1}\overline{\mathbf{K}}_{\mathbf{u}\varphi} + \overline{K}_{\varphi\varphi}\right]} \quad (12)$$

Sabendo-se que a corrente elétrica pode ser definida como a variação da carga no tempo, tem-se:

$$I_p = \dot{Q}_p \quad (13)$$

onde I_p é a corrente elétrica gerada pela pastilha piezoelétrica.

Passando-se a equação (13) para o domínio da frequência, $\tilde{I}_p = i\omega\tilde{Q}_p$, e substituindo-a na equação (12), obtém-se a expressão da Função de Resposta em Frequência para Impedância $(\tilde{V}_p/\tilde{I}_p)$ como:

$$Z(\omega) = \frac{\tilde{V}_p}{\tilde{I}_p} = \frac{1}{i\omega \left[\bar{\mathbf{K}}_{\phi\mathbf{u}} (\omega^2 \mathbf{M} - i\omega \mathbf{D} - \mathbf{K}_{\mathbf{uu}})^{-1} \bar{\mathbf{K}}_{\mathbf{u}\phi} + \bar{K}_{\phi\phi} \right]} \quad (14)$$

Invertendo-se a tensão pela corrente na equação (14), chega-se a uma expressão para Função de Resposta em Frequência da Admitância $(\tilde{I}_p / \tilde{V}_p)$:

$$Y(\omega) = \frac{\tilde{I}_p}{\tilde{V}_p} = i\omega \left[\bar{\mathbf{K}}_{\phi\mathbf{u}} (\omega^2 \mathbf{M} - i\omega \mathbf{D} - \mathbf{K}_{\mathbf{uu}})^{-1} \bar{\mathbf{K}}_{\mathbf{u}\phi} + \bar{K}_{\phi\phi} \right] \quad (15)$$

Apesar de terem sido encontradas expressões para as Funções de Resposta em Frequência das três grandezas que serão analisadas, os resultados que serão utilizados no MATLAB, para o cálculo dos índices, são aqueles calculados pelo ANSYS relativos à Elastância, com os devidos ajustes: para encontrar a Impedância o resultado de $\tilde{V}_p / \tilde{Q}_p$ será multiplicado por $1/i\omega$ e para encontrar Admitância será feita a inversão do resultado encontrado para Impedância.

Capítulo 3

Índices utilizados para detecção

Mensurar o dano, através de índices, significa atribuir uma quantidade escalar, através de parâmetros estatísticos, para o resultado da comparação entre duas medidas que se diferem pela presença do dano. Idealmente, o índice deveria indicar somente as alterações causadas pela presença do dano, mas na prática isso não ocorre, pois nas condições normais de operação existem variações, como: mudanças de temperatura, pressão, vibrações ambientes, etc., que interferem nas medidas utilizadas para calculá-los. Na literatura, várias métricas têm sido empregadas para realizar esse tipo de comparação. Neste trabalho, serão analisadas algumas métricas relacionadas a duas técnicas de detecção diferente: uma de baixa frequência que utiliza parâmetros modais, e outra de alta frequência que utiliza comparações espectrais das curvas de resposta em frequência.

3.1. Índices Modais

Mudanças nas propriedades físicas da estrutura, tal como redução da rigidez provocada pela presença do dano, podem ser detectadas através de alterações nos parâmetros modais, como, por exemplo, mudança na frequência de vibração. Por causa deste efeito, os parâmetros modais podem ser utilizados como indicadores de dano na estrutura.

Por sua facilidade de obtenção em casos práticos e por sua ampla utilização em estudos de SHM, as variáveis modais utilizadas nesse trabalho para o cálculo dos índices serão as frequências naturais. Apesar de sua baixa sensibilidade, exigindo medidas mais precisas e/ou os danos maiores, estudos têm mostrado que as frequências naturais sofrem menores variações estatísticas do que outros parâmetros modais.

3.1.1. *Variação Relativa das Frequências Naturais (VRFN)*

O cálculo do índice baseado na Variação Relativa das Frequências Naturais será feito com base na diferença relativa entre as frequências naturais da estrutura sem e com defeito. Devido às frequências naturais serem propriedades globais da estrutura, não é claro se alterações neste parâmetro poderiam ser utilizadas para identificar mais do que simplesmente a presença do dano na estrutura. Entretanto, a existência de duas pastilhas piezoelétricas numa mesma estrutura permite a comparação entre os parâmetros modais para diferentes condições

de contorno elétricas para cada pastilha piezoelétrica e, assim, espera-se poder avaliar além do crescimento do defeito, o seu posicionamento em relação às pastilhas. Tentar-se-á, através das modificações das condições elétricas dos materiais piezoelétricos, identificar alguma variação na frequência que possa estar relacionada com a posição do defeito na estrutura. Isso será feito através da comparação entre os índices $VRFN$ calculados usando três tipos de condições de contorno elétricas para pastilhas piezoelétricas, definidas abaixo:

- i. Ambas as pastilhas em circuito fechado, sc/sc ;
- ii. Primeira pastilha em circuito aberto e segunda em circuito fechado, oc/sc ;
- iii. Primeira pastilha em circuito fechado e segunda em circuito aberto, sc/oc .

Na equação (16) é apresentado cálculo para o índice $VRFN$ levando-se em consideração as condições de contorno elétricas das pastilhas.

$$VRFN_{P1/P2}^j = \left| \frac{f_{P1/P2}^{jd} - f_{P1/P2}^j}{f_{P1/P2}^j} \right| \times 100 \quad (16)$$

onde $P1/P2$ representa as condições de contorno elétricas das pastilhas piezoelétricas 1 e 2, $f_{P1/P2}^j$ é a j -ésima frequência natural da estrutura sem defeito e $f_{P1/P2}^{jd}$ é a aquela da estrutura com defeito.

Para se tentar estimar a posição da delaminação, o índice $VRFN_{sc/sc}$ será tomado como referência. Seu valor será confrontado com o valor dos índices $VRFN_{oc/sc}$ e $VRFN_{sc/oc}$. Através desse processo, pretende-se chegar a alguma conclusão acerca da posição do defeito, uma vez que o valor do índice $VRFN$, calculado para os três tipos de condições de contorno elétricas, apresentará um crescimento gradual com o aumento do dano, entretanto, espera-se que esse crescimento seja diferente para os índices $VRFN_{oc/sc}$ e $VRFN_{sc/oc}$, comparado com o índice $VRFN_{sc/sc}$. Esta diferença indicará qual pastilha está mais próxima do defeito. Por exemplo, caso a delaminação esteja mais próxima da primeira pastilha, espera-se que o índice $VRFN_{oc/sc}$ seja mais influenciado pela presença da delaminação, situação inversa ocorreria caso o dano estivesse próximo da pastilha dois.

3.1.2. Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (VEMCC)

O Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (EMCC, do inglês *Electromechanical Coupling Coefficient*) é uma medida utilizada em materiais piezoelétricos para quantificar a eficiência de conversão da energia elétrica em energia mecânica e vice versa, e é muitas vezes empregado como um dos parâmetros de diferenciação entre esses materiais. Ele pode ser calculado para o material piezoelétrico unido a estrutura, servindo como um indicador de dano, uma vez que mudanças na rigidez da estrutura, ocasionada pelo dano, geram mudanças na energia de deformação da pastilha piezoelétrica em suas vizinhanças, afetando a energia elétrica armazenada na pastilha devida ao acoplamento eletromecânico entre a pastilha e a estrutura, e conseqüentemente, alterando a eficiência na conversão de energia pela pastilha piezoelétrica.

Vários métodos são encontrados na literatura para calcular o EMCC de uma pastilha piezoelétrica, destacando-se dois. O primeiro baseia-se na razão das energias internas quando a pastilha piezoelétrica está em circuito aberto ou fechado. O outro se baseia na frequência de ressonância do material piezoelétrico, calculado através das frequências de ressonância e anti-ressonância oriundas da fórmula da admitância elétrica. As frequências de ressonância e anti-ressonância também são referenciadas como as frequências naturais para circuito aberto e circuito fechado, respectivamente, da pastilha piezoelétrica, e são facilmente medidas através de experimentos. Nesse trabalho, no entanto, será utilizada uma medida similar, mas que seja afetada pelo comportamento dinâmico da estrutura. Esta medida pode ser dada pelo EMCC efetivo da estrutura calculado com base nas frequências de ressonância da estrutura para a qual a pastilha piezoelétrica de interesse é colocada nas condições de circuito aberto e fechado [46]. As equações (17) e (18) representam o EMCC efetivo do PZT 1 e do PZT 2, respectivamente, para o j -ésimo modo de vibração da estrutura. A diferenciação entre as equações está na condição elétrica da pastilha da qual se está calculando o EMCC. Assim, por exemplo, para calcular o EMCC efetivo do PZT 1, é necessário calcular a frequência de ressonância com o PZT 1 nas condições de circuito aberto e fechado. As outras pastilhas, no caso do PZT 2, são mantidas em circuito fechado nos dois casos. Esse procedimento deve ser feito para a estrutura com e sem defeito.

$$EMCC_{P1}^j = \left(1 - \frac{f_{sc/sc}^j{}^2}{f_{oc/sc}^j{}^2} \right) \times 100 \quad (17)$$

$$EMCC_{P2}^j = \left(1 - \frac{f_{sc/sc}^j{}^2}{f_{sc/oc}^j{}^2} \right) \times 100 \quad (18)$$

onde $f_{sc/sc}^j$ é a j -ésima frequência de ressonância da estrutura sem defeito com o PZT 1 e o PZT 2 em circuito fechado, $f_{oc/sc}^j$ é a mesma com o PZT 1 em circuito aberto e o PZT 2 em circuito fechado e $f_{sc/oc}^j$ é aquela com o PZT 1 em circuito fechado e PZT 2 em circuito aberto.

Calculados os EMCC para PZT 1 e 2, para estrutura com e sem defeito, o próximo passo será calcular a variação, em pontos percentuais, do EMCC através da equação (19) e (27), para PZT 1 e 2, respectivamente.

$$VEMCC_{P1}^j = \left| EMCC_{P1}^j - EMCC_{P1}^{jd} \right| \quad (19)$$

$$VEMCC_{P2}^j = \left| EMCC_{P2}^j - EMCC_{P2}^{jd} \right| \quad (20)$$

onde $EMCC$ e $EMCC^d$ são os coeficientes de acoplamentos eletromecânicos para a estrutura sem e com defeito, respectivamente.

Diferentemente do $VRFN$, o $VEMCC$ é calculado individualmente para cada sensor permitindo que a análise da posição do defeito seja feita de forma direta, isto é, quanto mais próximo o dano está do sensor maior deve ser o seu valor, calculado para aquele sensor.

3.2. Índices Baseados na Resposta em Frequência

Enquanto que as Funções de Resposta em Frequência (FRF) fornecem informações qualitativas sobre o dano, informações quantitativas podem ser obtidas através de métricas escalares, que simplificam a interpretação da variação da grandeza em estudo e resume as informações extraídas das curvas de resposta em frequência. Nesta seção, serão apresentados os índices utilizados para quantificar as curvas de resposta em frequência das grandezas impedância, admitância e elastância, traçadas para estrutura com e sem defeito. Eles serão calculados usando parte real, parte imaginária e amplitude de tais grandezas complexas.

Os índices calculados a partir das FRF comparam a amplitude de dois espectros de frequência, com dano e sem dano, e associam um valor escalar a essa comparação. Idealmente, os índices baseados no método da impedância deveriam avaliar o espectro da frequência e indicar a presença, localização e severidade do dano. Nesse estudo, isso será possível devido à presença de duas pastilhas piezoelétricas que fornecem informações sobre o mesmo defeito, mas de posições diferentes, permitindo a comparação entre os sinais medidos e a estimativa da localização do defeito.

Nas próximas seções, algumas métricas escalares para simplificar a análise das curvas de resposta em frequência são apresentadas.

3.2.1. Desvio quadrático médio (RMSD)

O índice *RMSD* decorre do desvio do valor quadrático médio (RMS) ou valor eficaz ajustado dos espectros de frequência, da estrutura com defeito, comparado àqueles da estrutura sem defeito, medidos através do material piezoelétrico. O valor eficaz é uma medida estatística calculada através da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da sequência de valores em análise, equação (21), podendo ser calculado tanto para uma série de valores discretos como para funções contínuas. É um caso especial da potência média com o expoente $p = 2$.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (21)$$

Sun et al. [28] e Giurgiutiu e Rogers [17] utilizam o índice *RMSD*, calculado a partir da Parte Real da Impedância, para quantificar o dano. Apesar de os autores darem o mesmo nome para os índices, eles são diferentes em relação à posição do somatório. O primeiro emprega o somatório fora da raiz quadrada, equação (22); já o segundo emprega-o dentro da raiz quadrada, equação (23). Essas modificações alteram o resultado final, justificando o estudo de ambos os índices nesse trabalho.

$$RMSD_{Sun} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(Z_i - Z_i^d)^2}{(Z_i)^2}} \times 100 \quad (22)$$

$$RMSD_{GR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i^d)^2}{\sum_{i=1}^n (Z_i)^2}} \times 100 \quad (23)$$

onde Z_i é o valor de um dos componentes da grandeza complexa em estudo para j -ésimo ponto de frequência, podendo ser a Parte Real, Parte Imaginária ou Amplitude, calculada para estrutura sem defeito, Z_i^d é a mesma componente da grandeza complexa em estudo só que calculada para estrutura com defeito.

Assim, um maior valor numérico para o índice $RMSD$, indica uma maior diferença entre os sinais medidos para estrutura com e sem defeito e, portanto, um maior dano na estrutura.

Embora seja muito utilizado em estudos de SHM, o índice $RMSD$ tem um problema inerente, efeitos de perturbação não relacionados ao dano (ex: variação de temperatura) alteram o espectro de frequência, o que afeta diretamente o valor do índice. Amenizações de tais efeitos não são fáceis de conseguir, e podem nem ser possíveis. Outras métricas de danos, baseadas em fórmulas estatísticas alternativas (desvio médio absoluto percentual, covariância, coeficiente de correlação, etc.) têm sido empregadas, entretanto elas não parecem aliviar completamente esse problema.

3.2.2. Desvio Médio Absoluto Percentual (MAPD)

Este índice é calculado a partir do somatório das variações da componente da grandeza em estudo para os casos da estrutura com defeito, em relação à estrutura sem defeito, em valores absolutos e percentuais. O índice $MAPD$ é muito similar ao índice $RMSD_{Sun}$, já que ambos consideram a média do desvio individual de cada ponto do sinal medido.

Na literatura, também existem algumas variações para o cálculo do índice $MAPD$, alguns autores que o utilizaram são Giurgiutiu [15] e Tseng e Naidu [48], entretanto essas diferenças não interferem no comportamento do índice e, portanto, nesse trabalho se utilizará a formulação proposta em [48].

$$MAPD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z_i - Z_i^d}{Z_i} \right| \quad (24)$$

sendo N o número de pontos de frequência no espectro analisado.

3.2.3. Covariância (COV)

A covariância mede a tendência e a força da relação linear entre duas variáveis distintas. É calculada pela média aritmética do produto das distâncias entre o valor da grandeza em cada ponto de frequência e a sua respectiva média para a estrutura sem e com defeito, podendo assumir valores positivo, negativo ou nulo. Se a covariância for igual a zero significa que a relação entre as variáveis em estudo é de independência, mas se os valores forem diferentes de zero pode existir alguma dependência entre elas. Assim, o índice *COV*, equação (25), vai quantificar a relação entre as componentes da grandeza em análise para a estrutura com e sem defeito.

$$COV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})(Z_i^d - \bar{Z}^d) \quad (25)$$

onde $\bar{Z}$ é a média de um dos componentes da grandeza complexa em estudo calculada para estrutura sem defeito e $\bar{Z}^d$ é a média da mesma componente da grandeza complexa em estudo só que calculada para estrutura com defeito.

Quanto mais próximo o valor do índice estiver de zero maior será a indicação da presença do dano e sua severidade, uma vez que o crescimento do dano na estrutura tende a enfraquecer a relação de dependência entre as curvas, com e sem dano, medidas para estrutura.

Infelizmente, a covariância não é sensível como estimador de relacionamento, pois assume valores de menos a mais infinito, sem ter um ponto de referência que delimita um grau forte de relacionamento de um grau fraco. Portanto, a covariância não consegue revelar o que seria uma relação forte nem fraca.

3.2.4. Desvio do Coeficiente de Correlação (CCD)

O coeficiente de correlação (CC) estabelece o nível da relação entre duas variáveis, entretanto não mede a relação causa-efeito entre elas. Ele mede em que grau e sentido (crescente/decrescente) existe relação linear entre duas grandezas. Os valores do coeficiente de correlação estão sempre contidos no intervalo de -1 a +1. Quando o coeficiente de correlação for igual a menos um a relação entre as variáveis é perfeitamente negativa e quando for mais um a relação é perfeitamente positiva. O valor igual a zero significa ausência de relacionamento linear.

Para o estudo de sinais, o coeficiente de correlação mede o relacionamento linear entre os dois sinais e sua escala independe da unidade de medida. O CC vale +1, quando todos os

picos do sinal da estrutura sem dano são iguais ao da estrutura com dano para as mesmas frequências. Quando o CC é -1 indica que todas as frequências onde o sinal da estrutura sem dano tem picos, o sinal da estrutura com dano tem vales, e vice versa. Assim, quanto menores valores para o CC, maior será o desvio no sinal, indicando maior nível de dano. Zangrai e Guirgiutiu [52] utilizaram o índice Desvio do Coeficiente de Correlação (CCD), que é $(1 - CC)^\alpha$ com diferentes variações para o valor de α . A equação (26) mostra o índice CCD para $\alpha = 1$.

$$CCD = 1 - \frac{1}{\sigma_Z \sigma_{Z^d}} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})(Z_i^d - \bar{Z}^d) \quad (26)$$

onde σ_Z é o desvio padrão de um dos componentes da grandeza complexa em estudo calculada para estrutura sem defeito e σ_{Z^d} é o desvio padrão da mesma componente da grandeza complexa em estudo só que calculada para estrutura com defeito.

3.2.5. Desvio do Coeficiente de Correlação ao Cubo (CCD^3)

Da mesma forma que foi definido no item anterior, o índice CCD^3 representa o Desvio do Coeficiente de Correlação, $(1 - CC)^\alpha$, só que agora para $\alpha = 3$, conforme a equação (27) apresentada abaixo.

$$CCD^3 = \left[1 - \frac{1}{\sigma_Z \sigma_{Z^d}} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})(Z_i^d - \bar{Z}^d) \right]^3 \quad (27)$$

Estudos têm revelado, Zangrai e Guirgiutiu [52], que o índice CCD com α variando de 3 a 7 apresenta melhor correlação entre a distância do sensor e localização do dano.

3.2.6. Norma Infinita (H_{inf})

Uma norma é uma função não negativa de valor real definida sobre um espaço vetorial que associa a cada vetor, desse espaço, um número real não-negativo, que representa sua magnitude. O conceito de norma está intuitivamente relacionado à noção geométrica de comprimento.

A norma infinita corresponde ao maior pico da função de resposta em frequência e pode ser obtida através da equação (28).

$$\|\mathbf{Z}\|_{\infty} = \lim_{p \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n |Z_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} = \max_{i=1}^n (|Z_i|) \quad (28)$$

onde $\|\mathbf{Z}\|_{\infty}$ é a norma infinita do vetor correspondente a uma das componentes da grandeza complexas em estudo, analisada para uma faixa de frequência pré-estabelecida.

Uma das formas de comparar as normas infinitas calculadas para estrutura com e sem defeito, é aplicar o índice H_{inf} que estima a variação entre as curvas mediadas através da diferença das normas calculadas para estrutura com e sem defeito, dividida pela norma da estrutura sem defeito. Para que o índice não assuma valores negativos, o módulo da diferença entre os valores das normas para a estrutura sem e com defeito é utilizado.

$$H_{inf} = \frac{\left| (\|\mathbf{Z}\|_{\infty})^2 - (\|\mathbf{Z}^d\|_{\infty})^2 \right|}{(\|\mathbf{Z}\|_{\infty})^2} \quad (29)$$

3.2.7. Norma Quadrada ou Euclidiana (H_2)

A Norma Quadrada pode ser obtida pela mesma fórmula utilizada para calcular a Norma Infinita, só que ao invés de se aplicar o limite para p tendendo ao infinito, p assume o valor 2, equação (30).

$$\|\mathbf{Z}\|_2 = \left(\sum_{i=1}^n |Z_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

onde $\|\mathbf{Z}\|_2$ é a Norma Quadrada para uma das componentes complexas da grandeza em estudo, analisada para uma faixa de frequência pré-estabelecida.

O índice H_2 será calculado da mesma forma que o Índice a H_{inf} , isto é, elevar-se-á ao quadrado as normas obtidas para estrutura sem e com defeito e se aplicará o módulo para o resultado da diferença entre as normas, conforme a equação (31).

$$H_2 = \frac{\left| (\|\mathbf{Z}\|_2)^2 - (\|\mathbf{Z}^d\|_2)^2 \right|}{(\|\mathbf{Z}\|_2)^2} \quad (31)$$

Capítulo 4

Resultados

4.1. Análise Modal

Com intuito de facilitar a análise, uma vez que os resultados serão apresentados em função dos modos de vibrar, uma tabela que correlaciona os diversos modos com suas frequências naturais, pode ser vista abaixo. Dada a pequena diferença que existe entre as frequências naturais da estrutura com as pastilhas piezoelétricas em SC/SC, SC/OC ou OC/SC, só serão apresentadas as frequências naturais para estrutura com as duas pastilhas em circuito fechado, SC/SC.

Tabela 1: Frequência natural dos cem primeiros modos de vibrar da estrutura sem defeitos e com as duas Pastilhas Piezoelétricas em circuito fechado.

modo	Freq. (kHz)	modo	Freq. (kHz)	modo	Freq. (kHz)	modo	Freq. (kHz)
1	0,035	26	26,536	51	71,638	76	122,050
2	0,178	27	31,367	52	72,480	77	122,550
3	0,619	28	32,155	53	73,766	78	122,950
4	0,950	29	33,737	54	74,085	79	123,930
5	1,651	30	34,495	55	76,726	80	128,050
6	2,601	31	37,578	56	80,002	81	129,100
7	3,463	32	38,144	57	82,127	82	132,020
8	3,737	33	40,760	58	85,596	83	134,360
9	4,376	34	42,801	59	86,019	84	139,630
10	6,235	35	43,810	60	86,412	85	140,290
11	6,808	36	44,155	61	90,724	86	140,340
12	9,183	37	44,563	62	92,149	87	143,150
13	10,208	38	49,200	63	98,097	88	143,800
14	10,878	39	49,572	64	98,683	89	144,360
15	11,304	40	55,203	65	100,660	90	146,320
16	12,299	41	55,785	66	103,390	91	148,410
17	14,713	42	56,401	67	103,420	92	152,190
18	15,598	43	57,713	68	104,410	93	155,010
19	16,436	44	60,142	69	107,260	94	156,680
20	17,390	45	61,235	70	110,260	95	158,260
21	18,891	46	61,753	71	110,350	96	164,140
22	20,606	47	65,630	72	115,550	97	164,300
23	23,906	48	67,663	73	116,290	98	166,240
24	24,763	49	69,221	74	117,850	99	166,450
25	25,969	50	70,047	75	118,760	100	167,200

Os resultados para os índices baseados na variação relativa da frequência natural da estrutura, com e sem defeito, podem ser vistos abaixo, através das figuras 18 e 19. A figura 18 corresponde a apenas uma das configurações possíveis para estrutura com dano, delaminação de 30 mm posicionada a 60 mm do engaste, com ambas as pastilhas piezoelétricas em circuito fechado. Apesar de a análise ter sido feita para os três tipos de configurações elétricas das pastilhas piezoelétricas estudadas (SC/SC, SC/OC e OC/SC), nos três tamanhos de delaminação (10, 20 e 30 mm) e nas três posições possíveis (60, 85 e 110 mm), optou-se por mostrar somente uma dessas combinações, pois se observou o mesmo comportamento em todos os casos, com pequenas variações, inerentes ao parâmetro alterado de um caso para o outro, como: variações na amplitude e deslocamentos de pico. Ressalta-se que as modificações nas configurações elétricas das pastilhas alternando-as de circuito fechado para aberto, nos casos estudados, em nada alteraram a variação percentual entre as frequências com e sem falha, o que evidenciou a falta de sensibilidade da frequência para determinar a posição do defeito.

Figura 18: Variação das frequências naturais em relação à referência para os cem primeiros modos com os PZTs 1 e 2 em circuito fechado (a) delaminação posicionada a 60 mm do engaste variando-se seu comprimento em 10, 20 e 30 mm; (b) delaminação de 30 mm de comprimento variando-se sua posição em relação ao engaste em 60, 85 e 110 mm.

Figura 18 (cont.): Variação das frequências naturais em relação à referência para os cem primeiros modos com os PZTs 1 e 2 em circuito fechado (a) delaminação posicionada a 60 mm do engaste variando-se seu comprimento em 10, 20 e 30 mm; (b) delaminação de 30 mm de comprimento variando-se sua posição em relação ao engaste em 60, 85 e 110 mm.

Na figura 18(a) é possível observar o aumento gradual da variação da frequência com o aumento da delaminação e na figura 18(b) observa-se a falta de sensibilidade dessa métrica para se determinar a posição da falha, uma vez que as curvas praticamente se sobrepõem. Com a finalidade de ampliar essas constatações para os outros casos estudados e reduzir a quantidade de informações, serão calculadas as médias em intervalo de modos de 25 em 25, para cada posição, nos três tamanhos de delaminação. Agrupando as médias através de gráficos de barras, figura 19, é possível identificar um comportamento que se repete para toda a faixa de frequência estudada.

Figura 19: Médias da variação das frequências naturais para quatro faixas, calculadas de 25 em 25 modos de vibração, das três posições de delaminação (60, 85 e 110 mm) nos três tamanhos de falhas (10, 20 e 30 mm), com os dois PZTs em circuito fechado.

A figura 19 mostra o comportamento similar que existe entre as várias combinações dos parâmetros estudados ao longo de toda faixa de frequência. Isto é, ocorre um aumento gradual no valor do índice quando se aumenta o tamanho da delaminação independentemente de sua posição. Ela também mostra que na faixa de frequência de 26 a 70 kHz, dos modos 26 a 50, os valores das médias das variações das frequências naturais são maiores, tornando essa faixa mais adequada para se medir e estudar variações no tamanho da falha na estrutura.

Passando-se para a análise do EMCC, também será apresentada apenas uma configuração para o defeito, delaminação de 30 mm, pois para os outros tamanhos de delaminação o comportamento se repete. Diferentemente da frequência natural, a análise do EMCC pode ser feito separadamente para o PZT 1 e para o PZT 2, possibilitando o estudo de suas variações, à medida que o defeito se aproxima ou se afasta das pastilhas piezoelétricas. Este tipo de análise permite estimar a posição do defeito, pois se espera que quanto mais próximo o defeito esteja do sensor, maior sua influência na resposta. Para demonstrar esse comportamento foram traçadas as curvas da variação do EMCC para duas posições de delaminação, 60 e 110 mm, pois nessas posições ocorre maior influência do defeito nas pastilhas devido a sua proximidade, figura 20.

Figura 20: Comparação da Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (EMCC), em pontos percentuais, dos PZTs 1 e 2 em relação à referência para os cem primeiros modos de vibração com uma delaminação de 30 mm (a) delamiação posicionada a 60 mm do engaste; (b) delaminação posicionada a 110 mm do engaste.

Figura 20 (cont.): Comparação da Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (EMCC), em pontos percentuais, dos PZTs 1 e 2 em relação à referência para os cem primeiros modos de vibração com uma delaminação de 30 mm (a) delaminação posicionada a 60 mm do engaste; (b) delaminação posicionada a 110 mm do engaste.

Pode-se observar pelas figuras 20(a) e 20(b) que as variações dos EMCC do PZT 1 e PZT 2 para os diferentes modos de vibração não são significativamente alteradas quando se altera a posição da delaminação. Esse fato descarta um estudo mais aprofundado, modo a modo, para se identificar variações que guardem alguma relação com a posição da falha.

Para se chegar a resultados mais gerais sobre a utilização EMCC na detecção de danos, serão traçados gráficos de médias da variação dos EMCC1 e EMCC2, para todos os casos em estudo, figura 21.

Figura 21: Médias do VEMCC, em pontos percentuais, em relação à referência para quatro faixas, calculadas de 25 em 25 modos de vibração, das três posições de delaminação 60, 85 e 110 mm, nos três tamanhos de falhas 10, 20 e 30 mm, (a) média do EMCC do PZT 1; (b) média do EMCC do PZT 2.

Figura 21 (cont.): Médias do *VEMCC*, em pontos percentuais, em relação à referência para quatro faixas, calculadas de 25 em 25 modos de vibração, das três posições de delaminação 60, 85 e 110 mm, nos três tamanhos de falhas 10, 20 e 30 mm, (a) média do EMCC do PZT 1; (b) média do EMCC do PZT 2.

A figura 21 mostra uma possível utilização do EMCC para se detectar o crescimento da delaminação, pela existência de um modesto crescimento gradual do índice com o aumento da delaminação nas faixas de modos 1-25 e 51-75. Apesar do cálculo do EMCC ser feito individualmente para cada pastilha piezoelétrica, o que teoricamente facilitaria a análise da posição da falha (pois se espera que quanto mais perto a falha esteja do sensor maior sua influência sobre ele) os resultados mostrados, figuras 21(a) e 21(b), sugerem a ineficiência do índice utilizando a variação do EMCC para se determinar a posição do defeito, uma vez que não ocorreram variações significativas em suas medidas de uma figura para outra, ou seja, de uma pastilha para outra.

Da figura 19, pode-se concluir que a variação percentual das frequências naturais da estrutura calculada com base nas frequências sem e com delaminação, para as pastilhas piezoelétricas configuradas em circuito fechado e/ou aberto, é uma boa métrica para se determinar o agravamento da falha, uma vez que as médias das variações das frequências tiveram um crescimento gradual com o aumento da delaminação. Outra conclusão que se pode tirar analisando as médias das variações das frequências, figura 19, é que as frequências naturais não são sensíveis as variações das posições da falha, visto que a modificação nos resultados quando elas são alteradas não é significativo. Além disso, não existe garantia, na prática, de que não houve inversão na ordem dos modos de vibrar e, portanto, as frequências em condições de dano diferentes podem não ser comparáveis.

O coeficiente de acoplamento eletromecânico, EMCC, também foi analisado, os resultados obtidos indicam que ele pode ser usado para se determinar o agravamento da delaminação, entretanto ele não apresentou a mesma constância observada na variação

relativa da frequência natural, com pode ser visto na figura 21, especificamente nos modos de 26 a 50. Quanto a sua utilização para se determinar a posição da delaminação, os resultados obtidos se mostraram inconclusivos, isso se deve em parte ao caráter global que o EMCC tem na estrutura, fazendo com que outros fatores, além da variação da posição da falha, influenciem na sua medida.

4.2. Análise Harmônica

Através da análise harmônica realizada em ANSYS foi possível extrair os dados necessários para se traçar as Funções de Resposta em Frequência em MATLAB, figuras 22, 23 e 24. Posteriormente estes dados serão utilizados para se calcular os índices que quantificaram a extensão dos danos causados pela delaminação. Da mesma forma que na Análise Modal, aqui também só será apresentada uma configuração para estrutura com defeito, delaminação de 30 mm posicionada a 60 mm do engaste, pois a intenção, neste momento, é mostrar o comportamento das FRF quando se altera a grandeza estudada (impedância, admitância e elastância) e suas medidas (Parte Real, Parte Imaginária e Amplitude). Além disso, extrair informações da FRF graficamente é extremamente complicado quando se está analisando técnicas de detecção de danos que funcionam melhor em altas frequências.

Figura 22: Funções de Resposta em Frequência para estrutura sem delaminação e com delaminação de 30 mm, posicionada a 60 mm do engaste, calculadas para Parte Real, Parte Imaginária e Amplitude da Impedância.

Figura 23: Funções de Resposta em Frequência para estrutura sem delaminação e com delaminação de 30 mm, posicionada a 60 mm do engaste, calculadas para Parte Real, Parte Imaginária e Amplitude da Admitância.

Figura 24: Funções de Resposta em Frequência para estrutura sem delaminação e com delaminação de 30 mm, posicionada a 60 mm do engaste, calculadas para Parte Real, Parte Imaginária e Amplitude da Elastância.

Observa-se nas figuras 22 e 23 que a Parte Imaginária e a Amplitude sofrem grandes variações ao longo da faixa de frequência, 0-50kHz, permitindo apenas visualizar, com facilidade, tendências gerais de crescimento ou declínio com o aumento da frequência. Uma melhor visualização dessas curvas seria possível se elas fossem traçadas em intervalos menores de frequência, aumentando consideravelmente a quantidade de informações, sem trazer, contudo, novas conclusões. Também pode ser observado que apesar da FRF da Amplitude ser uma composição das Partes Real e Imaginária, o comportamento da curva acaba sendo parecido com a da Parte Real, mas as variações são influenciadas pela Parte Imaginária.

Apresentado o comportamento das Curvas de Resposta em Frequência para as grandezas e medidas que serão estudadas, passa-se ao cálculo dos índices utilizando o MATLAB. Os índices que serão calculados são aqueles que foram apresentados no tópico anterior. Para se concluir a respeito da faixa de frequência em que o índice apresenta melhor desempenho, optou-se por calculá-los em cinco faixas de frequência em intervalos de 10 kHz: 0-10 kHz, 10-20 kHz, 20-30 kHz, 30-40 kHz e 40-50 kHz. Apesar de esta escolha tornar a análise mais completa, ela acrescenta mais um parâmetro que deve ser combinado com os outros, aumentando ainda mais o número de informações a serem manipuladas.

O desempenho dos índices está intrinsecamente relacionado com as condições em que eles são calculados. O cálculo depende da grandeza estudada (impedância, admitância ou elastância), da componente da grandeza medida (Parte Real, Imaginária ou Amplitude) e da faixa de frequência selecionada.

A análise será dividida em duas partes. Primeiro se estudará a habilidade dos índices em detectar o agravamento do defeito com o aumento da delaminação. Isso será feito através de gráficos de barras para o PZT 1 e para o PZT 2, sendo que nesses gráficos serão apresentados, para cada posição de delaminação, os valores dos índices calculados aumentando o tamanho da delaminação (Figura 25a). Na segunda parte será analisada a capacidade do índice em informar o quão perto o defeito está do PZT 1 ou do PZT 2, possibilitando aferir a posição do defeito, isso será feito através da comparação dos gráficos de barras do valor do índice calculado para o PZT 1 e para o PZT 2 nas três posições de delaminação para um mesmo tamanho delaminação, procedimento que se repetirá para todas tamanhos de delaminação, figura 25(b). Esses estudos serão feitos para cada faixa de frequência analisada. Os valores empregados (normalizados) na figura 25 são considerados ideais e as disposições das barras no gráfico serão tomadas como referência na escolha dos melhores índices.

Figura 25: Representação dos gráficos de barras que serão utilizados nas análises. (a) gráfico para se determinar a crescimento da delaminação; (b) gráfico para se determinar a posição da delaminação.

Devido à grande quantidade de dados (3 grandezas x 3 medidas x 8 índices x 5 faixas de Frequência x 2 PZTs x 3 tipos de delaminação x 3 posições de delaminação = 6480 análises e comparações), será necessário realizar uma pré-seleção até se chegar aos melhores índices para se determinar a posição e o agravamento da falha. Assim, dois critérios de comportamento desejado serão utilizados para se determinar os índices a serem mantidos e estudados em detalhe: 1) Para o crescimento da falha: aumento gradual do índice com o aumento da falha, nas três posições estudadas, para ambos os sensores; 2) Para a posição da falha: ocorrer simultaneamente para os três tamanhos de dano um aumento considerável no valor do índice à medida que o dano se aproxima do sensor (ver representação do

comportamento desejado na figura 25 e 26, esta para as médias normalizadas). Os índices selecionados com base nestes dois critérios podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2: Apresentação dos índices que foram selecionados utilizando o critério (1) crescimento da falha; e (2) posição da falha.

Índices	Impedância			Admitância			Elastância		
	Re	Im	Abs	Re	Im	Abs	Re	Im	Abs
$RMSD_{Sun}$	1, 2			1, 2				1, 2	
$RMSD_{GR}$	1	1	1	2					
$MAPD$	1, 2			1, 2				1, 2	
COV									
CCD	1	1	1	2					
CCD^3	1	1	1	2					
H_2		1, 2	1, 2		2	2	2		2
H_{inf}

Figura 26: Gráficos das médias dos índices normalizados tidos como ideais para o caso em estudo (a) critério de crescimento; (b) critério de posição.

Pode-se concluir da tabela 2 que os índices COV e H_{inf} não devem ser utilizados para esse tipo de análise, ou pelo menos nesse modelo de estrutura, pois apresentaram resultados que destoam e são incompatíveis com os resultados esperados.

Abaixo serão apresentados os gráficos de barras dos índices selecionados, para o critério de crescimento, figuras 27, 28 e 29. Estes servirão de base para cálculo das médias dos índices normalizados. Os índices calculados serão agrupados segundo a medida utilizada para o seu cálculo - Parte Real, Parte Imaginária e Amplitude -, independentemente da grandeza. Esta disposição foi escolhida por facilitar à comparação dos índices calculados para as diferentes grandezas, mantendo-se como referência a mesma medida, entretanto, outros critérios poderiam ter sido utilizados para organizar os índices.

Os índices calculados sobre a Parte Real da elastância, Parte Imaginária da admitância e Amplitude da admitância e elastância, não atenderam o requisito, aumento gradual nas três

posições estudadas para ambos os sensores, sendo que em alguns casos, ambos os PZTs não atenderam, e em outros, um dos PZTs atendeu e o outro não. Os índices que atenderam as condições impostas pelo critério 1, foram calculados na faixa de frequência de 0-10 kHz, as outras faixas apresentaram o mesmo comportamento citado anteriormente para os índices que não atenderam o requisito.

Figura 27: Índices calculados com base na Parte Real, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d, e) Impedância; (f, g) Admitância.

Figura 27 (cont.): Índices calculados com base na Parte Real, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d, e) Impedância; (f, g) Admitância.

Figura 27 (cont.): Índices calculados com base na Parte Real, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d, e) Impedância; (f, g) Admitância.

Figura 28: Índices calculados com base na Parte Imaginária, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d) Impedância; (e, f) Elastância.

Figura 28 (cont.): Índices calculados com base na Parte Imaginária, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d) Impedância; (e, f) Elastância.

Figura 28 (cont.): Índices calculados com base na Parte Imaginária, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d) Impedância; (e, f) Elastância.

Figura 29: Índices calculados com base na Amplitude da Impedância, que se comportaram segundo o critério 1.

Figura 29 (cont.): Índices calculados com base na Amplitude da Impedância, que se comportaram segundo o critério 1.

Observa-se nas figuras acima que todos os índices selecionados foram calculados na faixa de frequência de 0-10 kHz, tornando esta faixa a mais indicada para se identificar o agravamento da delaminação.

Apesar dos índices selecionados nas figuras 27, 28 e 29 mostrarem o crescimento gradual do dano com o aumento da delaminação, seus valores não estão na mesma ordem de grandeza, e dentro do mesmo índice, ocorrem variações de amplitude para os dois PZTs, dificultando a comparação. Para anular estes efeitos e unificar os dados de ambos os PZTs, serão calculadas as médias dos índices normalizados. A normalização será feita individualmente para cada PZT, isto é, para cada PZT, associado a um índice, será identificado qual é o maior valor para determinada posição e tamanho de delaminação, este valor assumirá valor unitário, dividindo ele por ele mesmo, e servirá de base para normalizar os outros valores calculados para o mesmo PZT. Feita a normalização para ambos os PZTs, o passo seguinte será calcular a média simples, do PZT1 e do PZT2, para cada posição e

tamanho de delaminação. Tais gráficos podem ser vistos nas figuras 30, 31 e 32, dispostas segunda a mesma lógica de apresentação descrita anteriormente.

Figura 30: Médias dos índices normalizados calculados sobre a Parte Real, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d, e) Impedância; (f, g) Admitância.

Figura 31: Médias dos índices normalizados calculadas sobre Parte Imaginária, que se comportaram segundo o critério 1: (a, b, c, d) Impedância; (e, f) Elastância.

Figura 32: Médias dos índices normalizados calculadas sobre a Amplitude da impedância, que se comportaram segundo o critério 1.

Do que foi exposto, utilizando o critério 1, pode-se concluir que a melhor grandeza para se detectar o aumento progressivo do defeito na estrutura é a impedância, pois ela foi a grandeza que mais apresentou índices que se encaixaram no critério, pré-estabelecido, para as três medidas calculadas, tabela 3. A faixa de frequência mais adequada para se realizar esse tipo de análise vai de 0 a 10 kHz, pois foi somente nesta faixa que os índices selecionados se enquadraram no critério 1.

Tabela 3: Índices que satisfizeram o critério 1, pré-estabelecido, separados pelas grandezas e medidas para as quais eles foram calculados.

	Parte Real	Parte imaginária	Amplitude
Impedância	$RMSD_{GR}$ $MAPD$ CCD CCD^3	$RMSD_{GR}$ CCD CCD^3 H_2	$RMSD_{GR}$ CCD CCD^3 H_2
Admitância	$RMSD_{Sun}$ $MAPD$		
Elastância		$RMSD_{Sun}$ $MAPD$	

Para identificar qual índice e medida utilizar, as figuras das médias dos índices normalizados, calculados para impedância, serão comparadas com a figura 26(a), que contém o perfil considerado ideal para essa medida. Na figura 33, é possível visualizar a sobreposição

dos valores obtidos com os valores esperados, dos índices que apresentaram um crescimento nítido e estável com o aumento da delaminação nas três posições estudadas.

Figura 33: Comparação dos Índices com melhor desempenho (critério 1) com o valor considerado ideal (a) índice $RMSD_{GR}$ calculado para Parte Imaginária e Amplitude da Impedância; (b) índice $RMSD_{GR}$ calculado para Parte Real da Impedância; (c) índice H_2 calculado para Parte Imaginária e Amplitude da Impedância.

Observa-se na figura 33 que o índice H_2 apresenta um crescimento mais rápido, derivada maior, e o índice $RMSD_{GR}$ um crescimento mais parecido com o modelo ideal, entretanto ambos se enquadram no critério.

Assim, através desta análise, foi possível identificar os conjuntos índice, grandeza, medida e faixa de frequência que melhor respeitaram o critério 1 (habilidade de identificar o crescimento do dano). Em todos os casos, a faixa de frequência mais interessante foi a de 0-10kHz. A grandeza que, em geral, melhor se comportou foi a impedância. Quanto aos índices e medidas, tanto o índice H_2 , calculado usando a amplitude ou a parte imaginária da impedância, quanto o índice $RMSD_{GR}$, calculado usando amplitude, parte real ou parte imaginária da impedância, foram considerados os melhores.

Definidos os parâmetros que melhor atendem a problemática de se tentar quantificar o aumento da delaminação, passa-se ao estudo da posição do defeito na estrutura. Como foi dito anteriormente, a técnica para se identificar a posição do defeito está vinculada ao

comportamento do índice ao se variar a posição da delaminação em relação aos PZTs. O que torna essa análise possível é a existência de pelo menos duas pastilhas piezoelétricas na mesma estrutura e o conhecimento prévio da distância entre elas. Pois, calculando-se o valor do índice para ambos os PZTs, e alterando-se a posição da delaminação no espaço entre elas, é possível estabelecer uma relação entre os valores medidos e posição do dano. Espera-se que quando o defeito está próximo de um dos PZTs o valor de seu índice supere o valor do índice medido para o outro PZT e quando ambos estão equidistantes do defeito os valores dos índices se igualem. Através dessa suposição foi estabelecido o critério 2, pois nem todos os índices calculados apresentaram esse comportamento nas cinco faixas de frequências estudadas e/ou para os três tamanhos de delaminação. Abaixo nas figuras 34, 35 e 36 serão apresentados os gráficos de barras para os índices selecionados através do critério 2, pré-estabelecido. Da mesma forma que os gráficos foram apresentados no critério 1, para facilitar a comparação das grandezas, eles serão agrupados segundo a medida que foram calculados e quando possível, apresentados na seguinte ordem de grandeza impedância, admitância e elastância.

Frisa-se que alguns índices, em certas faixas de frequência, comportaram-se da maneira que se esperava, entretanto isso não ocorreu para todos os tamanhos de delaminação, exigido pelo critério 2. O caso mais comum foi o índice se comportar bem na faixa de frequência de 30-40 kHz para a delaminação de 10 mm e para as delaminações de 20 e 30 mm na faixa de 40-50 kHz.

Figura 34: Índices calculados com base na Parte Real dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (a, b) Impedância; (c, d, e, f, g) Admitância e (1h, 2h) Elastância.

Figura 34 (cont.): Índices calculados com base na Parte Real dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (a, b) Impedância; (c, d, e, f, g) Admitância e (1h, 2h) Elastância.

Figura 34 (cont.): Índices calculados com base na Parte Real dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (a, b) Impedância; (c, d, e, f, g) Admitância e (1h, 2h) Elastância.

Figura 35: Índices calculados com base na Parte Imaginária dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) Impedância; (1b, 2b, 3b) Admitância e (c, d) Elastância.

Figura 35 (cont.): Índices calculados com base na Parte Imaginária dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) Impedância; (1b, 2b, 3b) Admitância e (c, d) Elastância.

Figura 35 (cont.): Índices calculados com base na Parte Imaginária dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) Impedância; (1b, 2b, 3b) Admitância e (c, d) Elastância.

Figura 36: Índices calculados com base na Amplitude dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) impedância; (1b, 2b) admitância e (1c, 2c) elastância.

Figura 36 (cont.): Índices calculados com base na Amplitude dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) impedância; (1b, 2b) admitância e (1c, 2c) elastância.

Figura 36 (cont.): Índices calculados com base na Amplitude dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) impedância; (1b, 2b) admitância e (1c, 2c) elastância.

Observa-se nas figuras 34, 35 e 36 que os índices $RMSD_{Sun}$ e $RMSD_{GR}$, $MAPD$, CCD e CCD^3 comportam-se melhor na faixa de frequência de 0-10 kHz e o índice H_2 nas faixas de 20-30 e 30-40 kHz, com exceção da Parte Imaginária da Admitância onde o índice H_2 também se enquadrou no critério na faixa de 10-20 kHz. Pela diversidade das informações, nenhuma conclusão a respeito da melhor faixa de frequência pode ser tirada nesse momento. Na figura 36, que mostra os índices calculados com base na Amplitude, também é possível observar que somente o índice H_2 se encaixou no critério 2.

Dada a diferença que existe na ordem de grandeza entre os valores dos índices e até mesmo dentro do próprio índice, quando ele é calculado para outros tamanhos de delaminação, torna-se imperativo para comparação, que os dados sejam sintetizados através da média dos índices normalizados. A normalização e a média serão calculadas da mesma forma que foi feito no critério 1, entretanto, aqui, a normalização será feita individualmente para cada tamanho de delaminação (buscando-se o maior valor entre os PZTs, nas três posições de delaminação) e a média aritmética, será a média dos três tamanhos de delaminação, para cada PZT. Esses gráficos podem ser vistos nas figuras 37, 38 e 39, apresentados da mesma ordem que as figuras acima.

Figura 37: Média dos índices normalizados calculadas com base na Parte Real dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (a, b) Impedância; (c, d, e, f, g) Admitância e (1h, 2h) Elastância.

Figura 37 (cont.): Média dos índices normalizados calculadas com base na Parte Real dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (a, b) Impedância; (c, d, e, f, g) Admitância e (1h, 2h) Elastância.

Figura 38: Média dos índices normalizados calculadas com base na Parte Imaginária dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a) Impedância; (1b, 2b, 3b) Admitância e (c, d) Elastância.

Figura 39: Média dos índices normalizados calculadas com base na Amplitude dos PZTs 1 e 2, que se comportaram segundo o critério 2: (1a, 2a,) Impedância; (1b, 2b) Admitância e (1c, 2c) Elastância.

As figuras 37, 38 e 39 mostram todos os índices normalizados, o que permite que eles sejam comparados, entretanto, ainda existe uma grande quantidade de informações a serem analisadas. Isso pode ser resolvido adotando-se mais um critério de seleção, que é a tentativa de se conformar os resultados obtidos pelo critério 2 a uma das presunções anteriormente mencionada: “espera-se que os valores dos índices calculados para os PZTs 1 e 2 sejam iguais quando a posição da delaminação se encontre a 85 mm do engaste”. Assim, dos índices simplificados pelas médias normalizados, serão selecionados aqueles que apresentarem para posição da delaminação de 85 mm valores para o PZT 1 e para o PZT 2 que não se excedam

em 10%. Na tabela 4 são apresentados todos os índices selecionados pelo critério 2 e assinalados, por asterisco, aqueles que se encaixam nesse novo critério.

Tabela 4: Índices que atendem o critério 2 e assinalados por * aqueles que apresentam para posição de delaminação de 85 mm valores que não se excedam em 10%.

	Parte Real		Parte imaginária		Amplitude	
	Índice	Faixa (kHz)	Índice	Faixa (kHz)	Índice	Faixa (kHz)
Impedância	$RMSD_{Sun}$	0-10	H_2	20-30	H_2	20-30*
	$MAPD$	0-10		30-40*		30-40*
Admitância	$RMSD_{Sun}$	0-10	H_2	10-20 20-30 30-40*	H_2	20-30 30-40*
	$RMSD_{GR}$	0-10				
	$MAPD$	0-10				
	CCD	0-10				
	CCD^3	0-10*				
Elastância	H_2	20-30	$RMSD_{Sun}$	0-10	H_2	20-30
		30-40*	$MAPD$	0-10		30-40*

Da Tabela 4 é possível constatar que a faixa de frequência adequada para se estudar a posição do defeito vai de 30 a 40 kHz, pois é nessa faixa que estão a maioria dos índices que atendem ao novo critério.

Resta agora definir qual índice utilizar e para que condições. Com auxílio da figura 40, que compara os valores dos índices calculados com os valores esperados, figura 26(b), pode-se chegar a essas conclusões.

Figura 40: Índices que apresentaram valores aproximados, para o PZT 1 e 2, quando calculados para delaminação posicionada a 85 mm do engaste e comparados com seus valores esperados. Parte Real: (a) Admitância (b) Elastância; Parte Imaginária: (c) Admitância (d, e) Impedância; Amplitude: (f) Admitância (g, h) Impedância (i, j) Elastância.

Figura 40 (cont.): Índices que apresentaram valores aproximados, para o PZT 1 e 2, quando calculados para delaminação posicionada a 85 mm do engaste e comparados com seus valores esperados. Parte Real: (a) Admitância (b) Elastância; Parte Imaginária: (c) Admitância (d, e) Impedância; Amplitude: (f) Admitância (g, h) Impedância (i, j) Elastância.

Observa-se na figura 40 que o índice com melhor desempenho é a norma H_2 , pois além de aparecer em maior quantidade, se comparada com CCD^3 , apresenta maior variação

entre os valores calculados para o PZT 1 e para o PZT 2 quando a delaminação está posicionada a 60 mm do engaste. O índice H_2 calculado na faixa de frequência de 20-30 kHz, com exceção da Amplitude da elastância, figura 40(i), apresentou desempenho inferior, comparados aos outros casos na posição do defeito a 110 mm do engaste, confirmando a faixa de frequência de 30-40 kHz como mais adequada.

Em relação a qual grandeza e medida utilizar, a escolha será feita com base nos índices da figura 40 que se encaixam nos parâmetros já definidos como mais adequados (índice H_2 e faixa de frequência 30-40 kHz), figuras 40(b), 40(c), 40(e), 40(f), 40(h) e 40(j). Entretanto, realizar apenas a análise visual para decidir qual índice utilizar não é muito suficiente, pois existem diferenças sutis entre as figuras mencionadas. Desta forma, para esses índices serão calculadas as razões entre os valores do PZT1 e do PZT2, para cada posição,

$$r = \frac{|M - m|}{m} \quad (32)$$

onde M e m são os valores da maior e da menor barra, respectivamente, para qualquer uma das três posições de delaminação.

Através da equação (32) é possível precisar a razão entre os valores dos índices calculados para cada PZT, e assim decidir qual conjunto de relações se encaixa melhor nos critérios de seleção. Na tabela 5 são apresentadas as razões do índice H_2 , para cada posição, calculado para 6 parâmetros diferentes, segundo a medida e grandeza. O índice que apresentou uma das maiores e mais parecidas razões para a posição da delaminação de 60 e 110 mm e uma razão muito pequena para a posição da delaminação de 85 mm, foi o índice H_2 calculado para parte real da elastância e parte imaginária da impedância.

Tabela 5: Razões entre os valores de cada Índice (H_2) calculado para o PZT 1 e PZT 2 para as três posições de delaminação.

	Distância da delaminação do engaste		
	60 mm	85 mm	110 mm
Parte Real Elastância	2,59	0,04	2,53
Parte Imag. Admitância	1,52	0,03	1,79
Parte Imag. Impedância	2,22	0,03	2,33
Amplitude Admitância	2,00	0,07	2,70
Amplitude Impedância	1,07	0,00	1,50
Amplitude Elastância	2,32	0,07	3,07

Considerando todos os critérios relativos ao posicionamento, isto é, consistência quando variado o tamanho do dano e razão entre os índices medidos pelas duas pastilhas, pode-se concluir sobre os conjuntos índice, grandeza, medida e faixa de frequência mais adequados para a identificação da posição do dano na estrutura, relativa à posição das pastilhas. Todos os casos considerados bons utilizaram o índice norma H_2 calculado na faixa de frequência 30-40kHz. Quanto à grandeza e medida, tanto a parte real da elastância como a parte imaginária da impedância aparecem como bons candidatos à detecção da posição relativa da delaminação na estrutura.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho, um estudo sobre técnicas de monitoramento de integridade estrutural através do método inverso foi desenvolvido. As técnicas foram aplicadas à identificação da existência, do tamanho e da posição de uma delaminação em uma estrutura compósita laminada usando duas pastilhas piezelétricas coladas à estrutura. Para isso foi desenvolvido, com auxílio de um software de elementos finitos (ANSYS), um modelo 2D de viga em balanço composta por seis camadas do mesmo material compósito, Carbono Epoxy (AS4/3501-6), que se alternam em relação à direção das fibras, direções X e Z, e possuindo em sua superfície superior duas pastilhas piezoelétricas, separadas por uma distancia de 100 mm, na função de sensor e atuador, simultaneamente.

No modelo foram introduzidos defeitos do tipo delaminação, dano mais recorrente em estruturas compósitas laminadas, em tamanhos (10, 20 e 30 mm - entre as duas camadas imediatamente abaixo das pastilhas) e posições (60, 85 e 110 mm do engaste) variadas. A delaminação foi representada deixando-se de se unir o espaço entre as camadas onde supostamente existiria a delaminação. Esta representação mostrou-se mais adequada, pois não acrescenta nem retira material da estrutura e permite que malha de elementos finitos seja construída de maneira uniforme. A vantagem de se criar a mesma malha regular para todos os casos, é minimizar sua influência na comparação dos resultados.

Depois de criado o modelo, foram realizadas as análises modais e harmônicas para extração dos dados que foram utilizados para calcular os índices. O método empregado para a solução da análise harmônica foi *Full*, pois em muitos casos as diferenças entre um estado e outro da estrutura são ínfimas, principalmente quando se está analisando defeitos muito pequenos.

Para sintetizar os dados obtidos no sentido de quantificar as alterações causadas pelo dano, possibilitando a comparação entre eles, foram calculados índices estatísticos, com base nos índices já empregados na literatura, utilizando o MATLAB. Tais métricas foram relacionadas a duas técnicas de detecção diferentes: uma de baixa frequência que utiliza parâmetros modais (*VRFN* e *VEMCC*) e outra de alta frequência que utiliza comparações espectrais das curvas de resposta em frequência das grandezas complexas elastância, admitância e impedância ($RMSD_{Sun}$, $RMSD_{GR}$, $MAPD$, COV , CCD , CCD^3 , H_2 , H_{inf}).

Dos resultados pode-se concluir que a Variação Relativa das Frequências Naturais (*VRFN*) da estrutura, calculada com base nas frequências sem e com delaminação, para as pastilhas piezoelétricos, configuradas em circuito fechado e/ou aberto, é uma boa métrica para se determinar o agravamento da falha, uma vez que as médias das variações das frequências tiveram um crescimento gradual com o aumento da delaminação, entretanto as frequências naturais não são sensíveis às variações das posições da falha, visto que não ocorre nenhuma modificação nos resultados quando elas são alteradas.

Para a variação do coeficiente de acoplamento eletromecânico (*VEMCC*), os resultados obtidos indicam que ele pode ser usado para se determinar o agravamento da delaminação, entretanto ele não apresentou a mesma constância observada na frequência natural. Quanto à sua utilização para se determinar a posição da delaminação, os resultados obtidos se mostraram inconclusivos, isso se deve em parte ao caráter global do EMCC.

No caso dos índices baseados no método da impedância que utilizam altas frequências para o monitoramento, devido à grande quantidade de dados (6480 análises e comparações), foi necessário realizar uma pré-seleção até se chegar aos melhores índices para se determinar a posição e o agravamento da falha. Dois critérios foram utilizados para se determinar quais índices sintetizar através de gráficos da média do índice normalizado: 1) Para o crescimento da falha: aumento gradual do índice com o aumento da falha, nas três posições estudadas, para ambos os sensores; 2) Para a posição da falha: ocorrer simultaneamente para os três tamanhos de dano um aumento considerável no valor do índice à medida que o dano se aproxima do sensor.

Seguindo os dois critérios, os índices que apresentaram melhor desempenho para estimar o crescimento da delaminação foram: H_2 calculado para a grandeza impedância na faixa de frequência de 0-10 kHz utilizando as medidas Amplitude e Parte Imaginária e $RMSD_{GR}$ calculado para a grandeza impedância na faixa de frequência de 0-10 kHz utilizando as medidas Amplitude, Parte Imaginária e Parte Real. Já para o critério da posição da delaminação somente o índice H_2 foi selecionado, os parâmetros que melhor se encaixaram nos critérios foram a parte real da elastância e a parte imaginária da impedância, ambas calculadas na faixa de frequência 30-40 kHz.

Uma das grandes dificuldades encontradas neste trabalho foi sintetizar os resultados obtidos através dos índices. Os resultados encontrados tiveram grande influência dos critérios utilizados como filtro, conclusões diferentes poderiam ter sido obtidas caso os critérios fossem outros. Algumas limitações em relação ao software de elementos finitos também

influenciaram nos resultados como, por exemplo, as restrições envolvendo os elementos planos.

Como proposta para um trabalho futuro pretende-se validar o modelo através de ensaios experimentais, estudar outros tipos defeitos aplicados à estrutura, estudar outras abordagens para modelagem da estrutura (p. ex. estruturas 3D) e otimizar a seleção dos índices que atendam a critérios pré-estabelecidos (p. ex. utilização de algoritmos genéticos), incluindo a análise de funções-objetivas que avaliem de forma global o quanto cada conjunto de grandeza, medida e faixa de frequência se aproxima do comportamento ideal.

Referências

- [1] Aldraihem, O.J. and Khdeir, A.A., Smart beams with extension and thickness-shear piezoelectric actuators. *Smart Materials and Structures*, v.9, n.1, p.1-9, 2000.
- [2] Annamdas, V. G. M., Soh, C.K., Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: Review and future issues. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v.21, n.1, p.41-59, January, 2010.
- [3] Baptista, F. G., Filho, J. V., Optimal frequency range selection for PZT transducers in impedance-based SHM systems. *IEEE Sensors Journal*, v.10, n.8, p.1297-1303, 2010.
- [4] Benjeddou, A., Trindade, M.A., and Ohayon, R., A unified beam finite element model for extension and shear piezoelectric actuation mechanisms. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, v.8, n.12, p.1012-1025, 1997.
- [5] Benjeddou, A., Trindade, M.A., and Ohayon, R., New shear actuated smart structure beam finite element. *AIAA Journal*, v.37, n.3, p.378-383, 1999.
- [6] Benjeddou A., Vijayakumar S., Tawfiq I., A new damage identification and quantification indicator for piezoelectric advanced composites. *3rd European Conf. on Computational Mechanics: Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering*, 2006.
- [7] Bhalla, S., Naidu, A. S. K., and Soh, C. K., Influence of Structure–Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE. *In Proceedings of ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems*, p.12–14, 2002a.
- [8] Bois, C., and Hochard, C., Measurement and Modeling for the Monitoring of Damaged Laminate Composite Structures. *In Proceedings of the 1st European Workshop on Structural Health Monitoring*, p.425-432, 2002.
- [9] Brunner, A.J., Barbezat, M., Chrysochoidis, N.A., Barouni, A.K., Saravanos, D.A., Delamination detection in composites using active piezoceramic wafer and AFC sensor. *Proceedings of the 4th European Workshop on Structural Health Monitoring*, p.657-664, 2008.
- [10] Chrysochoidis, N., Barouni, A., Saravanos, D., On the delamination detection in composite beams with active piezoelectric sensors using non-linear ultrasonics. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v.7295, 2009.

- [11] Doebling S.W., Farrar C. R., Prime M. B., Shevitz D. W., Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review. *Report LA-13070-MS, Los Alamos, NM*, 1995.
- [12] Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W., A review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties. *The Shock and Vibration Digest*, v.30, n.2, p.91-105, 1998.
- [13] eFunda: Engineering Materials <http://www.efunda.com>, acesso em agosto de 2009.
- [14] Ghaffari, H., Saeedi, E., Zabihollah, A., Ahmadi, R., Application of vibration based technique in health monitoring of multi-stable laminated composites. *TIC-STH'09: 2009 IEEE Toronto International Conference - Science and Technology for Humanity*, p.170-175, 2009.
- [15] Giurgiutiu, V., Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. *Elsevier Academic Press*, 760 pages, ISBN 978-0120887606, 2008.
- [16] Giurgiutiu, V., Harries, K., Petrou, M., Bost, J., Quattlebaum, J., Disbond detection with piezoelectric wafer active sensors in RC structures strengthened with FRP composite overlays. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, v.2, n.2, p.213-223, 2003.
- [17] Giurgiutiu V., Rogers C A., Recent advancements in the electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE Smart Structures and Materials. *Conf. San Diego, California, Proc. SPIE*, v.3329, p536–47, 1998.
- [18] Hagood, N.W., Von Flotow, A., Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. *Journal of Sound and Vibration*, v.146, n.2, p.243-268, 1991.
- [19] IEEE 1987 *IEEE Standards on Piezoelectricity* Std 176-1987.
- [20] Ikeda, T., Fundamentals of Piezoelectricity. *Oxford University Press*, 1990.
- [21] Inman, D.J., Farrar, C.R., Lopes Jr., V., Steffen Jr., Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems. *John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, UK*, 2005.
- [22] Inman, D. J.. Smart Structures: Examples and New Problems. *Proceedings, 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2001)*, Uberlândia, Brazil, November 26-30, (Opening Plenary Lecture), v.12, p.4-13, 2001.
- [23] Ip, K., Mai, Y., Delamination detection in smart composite beams using Lamb waves. *Smart Materials and Structures*, v.13, n.3, p.544-551, 2004.
- [24] Khdeir, A.A., Aldraihem, O.J., Deflection analysis of beams with extension and shear piezoelectric patches using discontinuity functions. *Smart Materials and Structures*, v.10, n.2, p.212-220, 2001.

- [25] Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., Stubbs, N., Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs. mode-shape-based method. *Engineering Structures*, v.25, p.57-67, 2003.
- [26] Lee, S.J. and Sohn, H., Active self-sensing scheme development for structural health monitoring. *Smart Materials and Structures*, v.15, p.1734 -1746, 2006.
- [27] Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A., Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems-Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. *Journal Intelligent Material Systems and Structures*, p.5-12, 1994.
- [28] Luo, S., Wang, L., Deng, Q., Peng, L., Harmonic response analysis for a laminated piezoelectric beam with an arbitrary delamination. *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*, v.28, n.3, p.63-67, 2009.
- [29] Maia, N.M.M., Silva, J.M.M., Almas, E.A.M., Damage detection in structures: From mode shape to frequency response methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.17, n.3, p.489-498, 2003.
- [30] Marqui, C.R., Modelagem de estruturas piezelétricas para aplicação em localização de falhas. *Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, UNESP, Ilha Solteira*, 2007.
- [31] Olsson, R., Thesken, J.C., Brandt, F., Jönssonand, N., Nilsson, S., Investigations of delamination criticality and the transferability of growthcriteria. *Composite Structures*, v.36, p. 221–247, 1996.
- [32] Owolabi, G.M., Swamidas, A.S.J., Seshadri, R., Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions. *Journal of Sound and Vibration*, v.265, p.1-22, 2003.
- [33] Palacz, M., Krawczuk, M., Vibration parameters for damage detection in structures. *Journal of Sound and Vibration*, v.249, n..5, p.999-1010, 2002.
- [34] Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R., and Inman, D.J., Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *The Shock and Vibration Digest*, v.35, n.6, p.451 - 463, 2003.
- [35] Park, G., Farrar, C.R., Rutherford, A.C., and Robertson, A.N., Piezoelectric active sensor self-diagnostics using electrical admittance measurements. *Journal of Vibration and Acoustics*, v.128, p.469–476, 2003.
- [36] Park, G., Farrar, C.R., Scalea, F.L., and Coccia, S., Performance assessment and validation of piezoelectric active-sensors in structural health monitoring. *Smart Materials and Structures*, v.15, p.1673 -1683, 2006.

- [37] Raja, S., Sreedeeep, R., and Prathap, G., Bending behavior of hybrid-actuated piezoelectric sandwich beams. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, v.15, p.611-619, 2004.
- [38] Release 10.0 Documentation for ANSYS, *Element Reference – Part I. Element Library – and Coupled-Field Guide – Chapter 7. Direct-Field Analysis*.
- [39] Reza Moheimani, S.O., A survey of recent innovations in vibration damping and control using shunted piezoelectric transducers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v.11, n.4, p.482-494, 2003.
- [40] Rytter, A., Vibration Based Inspection of Civil Engineering. *Ph. D. Dissertation, University of Aalborg, Denmark*, 1993.
- [41] Steffen Junior, V., Rade, D. A., Fundamentos e Aplicações de Materias Inteligentes. *Anais do 3º congresso Temático de Dinâmica e Controle de SBMAC*, 2004.
- [42] Sun, C.T. and Zhang, X.D., Use of thickness-shear mode in adaptive sandwich structures. *Smart Materials and Structures*, v.4, n.3, p. 202-206, 1995.
- [43] Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C.A., Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor Actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v.6, p.134–139, 1995a.
- [44] Sunar, M. and Rao, S.S. Recent advances in sensing and control of flexible structures via piezoelectric materials technology. *Applied Mechanics Review*, v.52, n.1, p.1 16, 1999.
- [45] Tan, P., Tong, L., A sensor charge output deviation method for delamination detection using isolated piezoelectric actuator and sensor patches. *Composites Part B: Engineering*, v.37, n.7-8, p.583-592, October/December, 2006.
- [46] Trindade, M. A.; Benjeddou, A., Effective electromechanical coupling coefficients of piezoelectric adaptive structures: Critical evaluation and optimization. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, v.16, n.3, p.210-223, April, 2009.
- [47] Trindade, M.A., Benjeddou, A., Ohayon R., Finite element modelling of hybrid active–passive vibration damping of multilayer piezoelectric sandwich beams—part II: System analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v.51, p.855-864, 2001.
- [48] Tseng, K., and Naidu, A., Non-Parametric Damage Detection and Characterization Using Smart Piezoceramic Materials. *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, 317–329, 2002.
- [49] Vel, S.S., Batra, R.C., Exact solution for the cylindrical bending of laminated plates with embedded piezoelectric shear actuators. *Smart Materials and Structures*, v.10, n.2, p.240-251, 2001.

- [50] Yan, W., Cai, J., Chen, W., Delamination detection in laminated composite beams using electro-mechanical impedance signatures. *2008 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, SPAWDA 2008*, p.374-379, 2008.
- [51] Yun, G., Shang, S., Qiao, P., Fast inverse identification of delamination of E-glass/epoxy laminated composite panels. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v.7294, 2009.
- [52] Zagrai, A.N. and Giurgiutiu, V. Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Plates. *Journal Intelligent Material Systems and Structures*, v.12, p.709-718, 2001.
- [53] Zhang, X.D. and Sun, C.T. Formulation of an adaptive sandwich beam. *Smart Materials and Structures*, v.5, n.6, p.814-823, 1996.
- [54] Zou, Y., Tong, L., Steven, G.P., Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures - a review. *Journal of Sound and Vibration*, v.230, n.2, p.357-378, 2000.

ANEXO I

Material Piezoelétrico PZT- 5H [52]

Densidade: $\rho = 7500 \text{ kg m}^{-3}$

$$[c] = \begin{bmatrix} 127.2 & 80.21 & 84.67 & 0 & 0 & 0 \\ 80.21 & 127.2 & 84.67 & 0 & 0 & 0 \\ 84.67 & 84.67 & 117.44 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 22.99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 22.99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23.47 \end{bmatrix} \cdot GPa$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17.035 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.035 & 0 & 0 \\ -6.623 & -6.623 & 23.24 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{C}{m^2}$$

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 741 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 741 & 0 & 0 \\ -274 & -274 & 593 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-12} \frac{C}{N}$$

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} 277.1 & 0 & 0 \\ 0 & 277.1 & 0 \\ 0 & 0 & 301 \end{bmatrix} \cdot 10^{-10} \frac{F}{m}$$

Material Carbono/Epoxy AS4/3501-6 [53]

Densidade: $\rho = 1389 \text{ kg m}^{-3}$

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	N_{23}
144,8	9,65	9,65	4,14	4,14	3,45	0,30	0,30	0,40