

MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE AERONAVES

TIAGO FERNANDES BITENCOURT ¹, VALDER STEFFEN JÚNIOR ²

Resumo

Este trabalho aborda as características principais dos processos de prognóstico de falha e monitoramento da integridade estrutural, com enfoque especial na técnica de monitoramento baseada na impedância eletromecânica. Prognóstico de falha consiste em prever o tempo de vida útil que determinado sistema estrutural, com um dano inserido, possui. O monitoramento da integridade estrutural é uma das etapas do processo de prognóstico de falha e consiste em detectar danos ocorridos na estrutura com o intuito de fornecer informações relevantes para que o prognóstico seja feito com precisão. Por suas características, a técnica de monitoramento através da impedância eletromecânica se mostra adequada ao uso no monitoramento contínuo de estruturas em serviço (monitoramento *on-line*). No entanto, alguns desafios devem ser superados até que esta técnica seja empregada nesse tipo de monitoramento. Neste trabalho, são apresentados dois experimentos que exemplificam a aplicação da técnica da impedância na detecção de danos comuns em estruturas aeronáuticas. Ao final, conclui-se que a técnica detecta e indica a severidade dos danos nos dois casos estudados.

Palavras chave: Monitoramento da integridade estrutural - Impedância eletromecânica - Prognóstico de falha.

¹ Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia – MG, 38400-902, tiagofb@ymail.com

² Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia – MG, 38400-902, vsteffen@mecanica.ufu.br

Abstract

This paper discusses the main characteristics of the damage prognosis and structural health monitoring processes, focusing on the impedance-based health monitoring technique. Damage prognosis is devoted to predict the remaining useful life of a structural system with an added damage. Structural health monitoring is one of the stages of the damage prognosis process and aim at detecting damage to the structure in order to provide reliable information for the prognosis to be done with precision. Due to its characteristics, the impedance-based monitoring technique appears to be appropriate for on-line monitoring. However, some challenges must be overcome before this technique is employed in this type of monitoring. This paper presents two experiments that illustrate the application of the impedance technique in the detection of common types of damage in aeronautical structures. At the end, it is concluded that this technique detects and indicates the severity of damage in the two simulated cases.

Keywords: Structural health monitoring - Impedance method - Damage prognosis.

1. Introdução

Um dos maiores desafios para os engenheiros envolvidos com sistemas estruturais é o de desenvolver soluções que possibilitem prever o tempo de vida útil que determinado sistema, com um dano inserido, possui. Essa previsão, denominada Prognóstico de Falha, é de grande interesse para as indústrias aeroespacial, civil e mecânica, pois proporciona ganhos consideráveis tanto em aspectos econômicos quanto em segurança.

Dentre os diversos tipos de sistemas estruturais que motivam o desenvolvimento de soluções de prognóstico de falha, por envolverem altos riscos e custos de manutenção, pode-se citar: estruturas civis (pontes, edifícios); estruturas aeronáuticas; estruturas *off-shore* (plataformas de extração de petróleo); tubulações para transporte de materiais nocivos à saúde e ao meio ambiente.

Mas, antes de abordar os aspectos básicos do processo de prognóstico de falha, é importante estabelecer a definição de duas palavras que já foram e serão muito utilizadas ao longo deste trabalho: dano e falha.

A definição considerada mais coerente para dano tem a ver com qualquer modificação intencional ou não intencional das propriedades físicas e/ou geométricas do sistema estrutural que podem

comprometer seu funcionamento, fazendo com que o mesmo não opere em suas condições ideais, mas ainda assim consiga exercer a função para a qual foi desenvolvido. No caso de sistemas mecânicos e estruturais, o dano pode se apresentar de diferentes formas; dentre as mais comuns pode-se citar as trincas, a ruptura ou afrouxamento de elementos de ligação, as deformações excessivas, além do desgaste e corrosão.

Pode-se afirmar que muitas vezes o dano leva à falha, que por sua vez é definida como as modificações no sistema que impossibilitam que o mesmo opere de forma satisfatória e consiga exercer suas funções.

Basicamente, o processo de prognóstico de falha consiste em avaliar o estado atual da estrutura, estimar as condições ambientais e de operação a que esta estrutura estará submetida e, através de simulações e do conhecimento do comportamento apresentado pela estrutura em operações passadas, prever o tempo de vida útil restante do sistema.

O Monitoramento da Integridade Estrutural, do inglês *Structural Health Monitoring* (SHM), se insere no processo de prognóstico de falha no momento da avaliação do estado atual da estrutura. Segundo Farrar *et al.* (2005), SHM envolve a observação do sistema estrutural ao longo do tempo através de medições de

sua resposta dinâmica amostradas periodicamente a partir de uma malha de sensores, a extração das características sensíveis ao dano das medidas obtidas e, finalmente, a análise estatística destas características para a determinação do estado atual do sistema relativo à sua integridade.

Desta forma, o objetivo do sistema de monitoramento deve ser o de acumular informação suficiente sobre o dano ocorrido para que as ações apropriadas para restaurar o desempenho anterior da estrutura, ou pelo menos garantir segurança, sejam tomadas (Worden, Dulieu-Barton, 2004).

Farrar *et al.* (2006) acreditam que o monitoramento da integridade estrutural pode ser expresso como um problema de reconhecimento estatístico de padrões. As soluções para esse problema requerem a observação de quatro passos: (1) avaliação operacional; (2) aquisição de dados; (3) extração de características; (4) desenvolvimento de modelos estatísticos para classificação das características.

A etapa de avaliação operacional deve responder a quatro quesitos relacionados à implementação de um sistema de monitoramento: (1) quais são as justificativas econômicas ou de segurança para monitorar a estrutura; (2) como é definido o dano para o sistema a ser monitorado; (3) quais são as condições de

operação e ambientais sob as quais o sistema a ser monitorado funciona; (4) quais são as limitações na aquisição dos dados enquanto o sistema estiver em funcionamento.

A etapa de aquisição de dados no processo de monitoramento envolve a seleção do método de excitação, o tipo, número e localização dos sensores, e ainda, as características do *hardware* de aquisição, transmissão, processamento e armazenamento dos sinais.

A extração de características sensíveis ao dano são informações extraídas dos dados provenientes do sistema de medição que estão relacionadas à presença de dano na estrutura monitorada.

Finalmente, a etapa de desenvolvimento de modelos estatísticos que visam classificar as características extraídas anteriormente está relacionada à implementação de algoritmos numéricos que determinam o estado da estrutura com relação à sua integridade. Os modelos estatísticos são comumente utilizados para responder a perguntas relacionadas à presença, localização, tipo e extensão do dano.

Assim, para melhor entendimento, a caracterização do dano pode ser abordada em cinco níveis (Worden e Dulieu-Barton, 2004):

1. Detecção: o modelo fornece uma informação qualitativa, se o dano ocorreu ou não;

2. Localização: o modelo fornece informação sobre a possível localização do dano;

3. Classificação: o modelo fornece informação sobre o tipo de dano;

4. Quantificação: o modelo fornece uma estimativa da severidade do dano;

5. Prognóstico: o modelo fornece informações sobre o tempo de vida útil que resta para o sistema (tempo antes da falha).

Ainda relacionado às etapas de aquisição de dados, extração de características e modelagem estatística, existem os processos de normalização, depuração, fusão e condensação dos dados.

O processo de normalização consiste em separar as mudanças na leitura do sensor provenientes de um dano, daquelas causadas pelas alterações nas condições ambientais ou de operação do sistema estrutural.

O processo de depuração consiste em selecionar as medidas que serão utilizadas ou rejeitadas no processo de monitoramento da integridade estrutural.

A fusão de dados é o processo de combinar informações provenientes de vários sensores com o intuito de aumentar a confiabilidade do processo de detecção do dano.

A condensação dos dados é o processo de reduzir a quantidade de dados ou de características extraídas com o objetivo de facilitar o armazenamento das informações e eliminar redundâncias.

Para que o prognóstico de falha seja feito com precisão e confiabilidade, é necessário que sejam desenvolvidas técnicas de monitoramento contínuo e em serviço que forneçam informações atualizadas relativas à integridade da estrutura sem a necessidade de paradas desnecessárias para inspeção, e que possibilitem ainda a prevenção de falhas catastróficas.

Existem diversos fatores que despertam o interesse pelo prognóstico de falha e pelo monitoramento da integridade estrutural, especialmente em aplicações relacionadas a sistemas aeroespaciais. Um destes fatores é a segurança de pessoas. O exemplo clássico é o acidente ocorrido em 1988 com o Boeing 737 da companhia Aloha Airlines que perdeu parte de sua fuselagem superior durante o voo. Esta falha foi ocasionada por trincas que se iniciaram devido à fadiga, e foram agravadas pela corrosão e falta de manutenção da aeronave (Farrar *et al.*, 2005). Se um sistema eficiente de monitoramento estivesse em funcionamento nessa aeronave, as pessoas responsáveis por sua manutenção poderiam

tomar as providências necessárias para que a falha catastrófica fosse evitada.

Outro fator motivador é o econômico. O procedimento adotado atualmente nos rotores de aeronaves militares dos Estados Unidos da América demonstra a necessidade do desenvolvimento de técnicas eficazes de prognóstico de falha. A explosão do disco do rotor resulta, na melhor das hipóteses, numa perda do motor e, na pior, na perda da aeronave. Segundo Larson *et al.*(2001), um disco é descartado se, após a inspeção, existir uma chance em mil de ocorrer uma falha no mesmo. O custo de um disco varia de US\$ 300.000 a US\$ 400.000. Neste caso, estatisticamente, a probabilidade é de que 999 discos de 1000 estão sendo descartados antes que sua vida útil segura seja completada. Desta forma, a economia mínima resultante da aplicação de técnicas eficazes de prognóstico de falha é de aproximadamente US\$30 a US\$40 milhões para cada 1000 discos (Farrar *et al.*, 2005).

Assim, com o esforço de pesquisadores tanto no meio acadêmico quanto no industrial, diversas técnicas de Monitoramento da Integridade Estrutural estão sendo desenvolvidas. Cada uma possui vantagens e desvantagens, o que resulta na inexistência de uma técnica que seja aplicável a todas as condições de monitoramento existentes.

Entre as técnicas de monitoramento possíveis de serem aplicadas em estruturas aeronáuticas, podem ser citadas as técnicas baseadas na análise do vácuo comparativo, da emissão acústica e da impedância eletromecânica, dentre outras. Neste trabalho, apenas a técnica baseada na impedância eletromecânica é abordada. Essa técnica se mostra como um método promissor de ensaio não-destrutivo para caracterização do dano em diversos tipos de estruturas. As técnicas de ensaio não-destrutivo, do inglês *nondestructive evaluation (NDE)*, têm a propriedade de manter as características da estrutura encontradas antes do início da avaliação. As técnicas tradicionais de NDE incluem ultra-som, campo magnético, líquido penetrante, raios-X, inspeção visual, entre outros. No entanto, a maioria destas técnicas requer a interrupção do funcionamento da estrutura e, em alguns casos, que a localização do dano seja conhecida previamente. Desta forma, não podem ser utilizadas para um monitoramento contínuo de estruturas em serviço.

1.1. Impedância Eletromecânica

Inicialmente proposta por Liang *et al.* (1994), a técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica consiste basicamente em monitorar a variação da

impedância mecânica da estrutura causada pela presença de um dano.

Sabendo que a impedância mecânica de um sistema mecânico pode ser definida como a razão entre a força aplicada em um ponto do sistema e a velocidade com que este ponto se desloca (Massoud, 1985), a variação da impedância mecânica ocorre porque o dano causa mudanças na rigidez e/ou massa da estrutura, afetando assim, as características dinâmicas da mesma.

Mas, devido à dificuldade de se monitorar diretamente a variação da impedância mecânica de estruturas complexas utilizando transdutores convencionais, alguns pesquisadores recorreram ao monitoramento da variação da impedância elétrica de materiais piezelétricos acoplados à estrutura. A impedância elétrica é a oposição que um circuito ou componente oferece à passagem de corrente alternada e pode ser calculada pela razão entre a tensão fornecida ao circuito ou componente e a corrente que passa por ele.

Os materiais piezelétricos são uma classe de materiais chamados inteligentes. Os materiais inteligentes possuem a habilidade de converter uma forma de energia em outra. Exemplos disso são as ligas de memória de forma que convertem energia térmica em mecânica e os fluidos magnetoreológicos que quando submetidos a um campo magnético produzem

deformações mecânicas. Os materiais piezelétricos, por sua vez, possuem a propriedade de se deformar mecanicamente em resposta a um campo elétrico aplicado (efeito inverso ou atuador) e produzir polarizações dielétricas em resposta a deformações mecânicas (efeito direto ou sensor). Dentre os materiais piezelétricos mais utilizados, podemos destacar o titanato zirconato de chumbo (PZT), um piezocerâmico, e o fluorido de polivinilideno (PVDF), um piezopolímero. O PZT foi o material utilizado no início do desenvolvimento da técnica da impedância eletromecânica, e por apresentar características tais como ampla faixa de linearidade, pouco peso, rápida resposta e rigidez geralmente superior à da estrutura que está acoplado, este material continua sendo largamente utilizado nas aplicações da técnica.

O modelo unidimensional eletromecânico que representa o processo de monitoramento através da impedância é mostrado na figura 1.

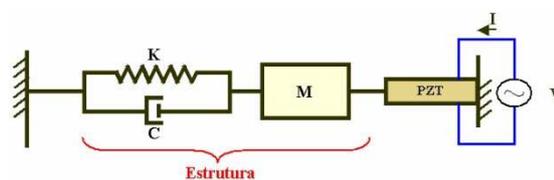


Figura 1: Modelo unidimensional do acoplamento PZT-estrutura.

Assumindo que uma das extremidades de um atuador PZT axial seja acoplada a

um sistema massa-mola-amortecedor, e a outra seja fixa, Liang *et al.* (1994) realizaram a importante demonstração de que a impedância elétrica do PZT está diretamente relacionada à impedância mecânica da estrutura à qual ele está acoplado, resultando na seguinte equação:

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i\omega a \left(\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (1)$$

onde: Y é a admitância elétrica (inverso da impedância) do atuador PZT; V é a tensão sobre o PZT; I é a corrente que passa pelo PZT; a é a constante geométrica do PZT; $\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero; δ é a perda dielétrica tangencial do PZT; $Z_a(\omega)$ e $Z(\omega)$ são as impedâncias mecânicas do PZT e da estrutura, respectivamente; d_{3x} é a constante de acoplamento piezoeletrico; \hat{Y}_{xx}^E é o módulo de Young.

Assumindo que as propriedades mecânicas do PZT permaneçam constantes ao longo do tempo, podemos perceber através da equação que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada à impedância mecânica da estrutura. Assim, qualquer mudança na impedância elétrica medida é considerada uma mudança na impedância mecânica da estrutura e, conseqüentemente, um indicativo da presença de dano. A

impedância do conjunto PZT-estrutura é denominada impedância eletromecânica.

A função de impedância é uma função complexa da frequência e geralmente é representada em gráficos da parte real e imaginária *versus* frequência, ou da magnitude e fase *versus* frequência. A parte imaginária da impedância é mais sensível à variação de temperatura do que a parte real porque a constante dielétrica do PZT ($\bar{\epsilon}_{33}^T$) é sensível à temperatura e afeta apenas a parte imaginária da função. Desta forma, a parte real é a mais utilizada nas aplicações de monitoramento (Park *et al.*, 2003).

Basicamente, o gráfico da impedância *versus* frequência é obtido da seguinte forma: aplica-se uma tensão alternada de baixa amplitude (geralmente $\leq 1V$) e alta frequência (maior que 20kHz) sobre o PZT, o que faz com que o mesmo vibre. Esta vibração, por sua vez, excita a estrutura à qual o PZT está acoplado, fazendo com que esta também comece a vibrar. Após este período de excitação da estrutura, cessa-se a aplicação de tensão sobre o PZT. No entanto, a estrutura continua vibrando, o que induz uma vibração no PZT. A deformação mecânica do PZT, decorrente desta vibração, produz uma pequena tensão de resposta. Pouco tempo após o sinal de excitação ter

cessado, essa resposta é adquirida. Os sinais de excitação e resposta são processados numericamente para a obtenção do ponto correspondente no gráfico. Este processo se repete para outras frequências de excitação, até que a faixa de interesse seja percorrida e o gráfico da função de impedância seja completado.

Geralmente, a faixa de frequência utilizada é encontrada pelo método da tentativa e erro, sendo escolhida aquela que apresenta o maior número de picos, pois isto indica a existência de uma maior interação dinâmica naquela banda de frequência.

A avaliação da integridade da estrutura é feita através da comparação dos gráficos de impedância obtidos em medições distintas. A primeira medição é feita no início da avaliação, assumindo que a estrutura encontra-se sem dano. Esses dados são chamados de *baseline*. Os dados obtidos em medições posteriores a esta são comparados com o *baseline*, permitindo assim avaliar a integridade da estrutura.

As altas frequências são utilizadas para garantir grande sensibilidade ao dano, pois o comprimento de onda da excitação é pequeno o bastante para detectar pequenas variações na integridade da estrutura. Além disso, sinais em alta frequência requerem baixa tensão para produzir uma excitação satisfatória na estrutura (Park e Inman, 2005).

Baseado no conhecimento adquirido através de vários estudos de caso, Esteban (1996) estima que, dependendo do material e da densidade da estrutura à qual o PZT está colado, a região sensível ao dano desta pastilha piezelétrica pode variar de 0,4 m (raio) em estruturas de concreto reforçado, até 2 m em vigas simples de metal.

O aparelho que gera o sinal de excitação, adquire o sinal de resposta e processa os dois sinais, é denominado analisador de impedância ou impedancímetro. Os analisadores de impedância comerciais, como o HP4194A mostrado na figura 2, são os mais utilizados em pesquisas no meio acadêmico.

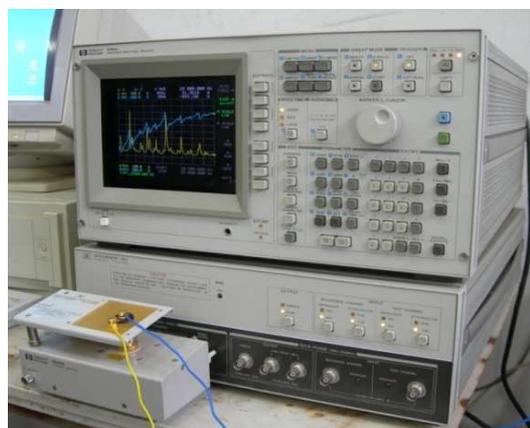


Figura 2: Analisador de impedância (HP4194A).

Porém, algumas características como o grande peso e volume, impossibilitam a utilização destes aparelhos em aplicações de monitoramento de estruturas em serviço. Além disso, o custo dos analisadores comerciais é alto

(aproximadamente US\$30.000,00) e apenas um conjunto pequeno de suas funções é utilizado na técnica da impedância eletromecânica. Em aplicações que possuem sérias restrições quanto ao peso e volume de equipamentos, como é o caso da aeronáutica, a possibilidade de utilização destes analisadores é descartada.

No entanto, algumas alternativas têm sido propostas com o intuito de substituir o uso de aparelhos como o HP4194A. Peairs *et al.* (2004) desenvolveram um método que utiliza um pequeno circuito que custa apenas US\$10,00 e um analisador de sinais com FFT (transformada rápida de Fourier) que é comumente encontrado em laboratórios de pesquisa e, ao contrário do impedancímetro, é um instrumento portátil. Entretanto, não é possível utilizar este instrumento embarcado em aeronaves e outras estruturas. Por isso, outras soluções estão sendo buscadas para possibilitar o monitoramento em serviço deste tipo de estrutura.

Uma vez que a avaliação dos gráficos da impedância nos fornece apenas informações qualitativas a respeito da integridade da estrutura, ou seja, se a estrutura está danificada ou não, a informação quantitativa à respeito desse dano geralmente é fornecida pelas denominadas *métricas de dano*. Essas métricas são valores escalares que representam a diferença entre duas funções

de impedância e representam a severidade do dano na estrutura. A métrica frequentemente empregada é o desvio médio da raiz quadrada (RMSD), introduzida por Sun *et al.* (1995) e definida por:

$$M = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[\operatorname{Re}(Z_{i,1}) - \operatorname{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\operatorname{Re}(Z_{i,1})]^2}} \quad (2)$$

onde M é a métrica do dano, $Z_{i,1}$ representa a impedância medida com a estrutura intacta (*baseline*), $Z_{i,2}$ representa o sinal a ser comparado com o *baseline*, e n indica o número de frequências na banda de avaliação.

Palomino (2008) utilizou diferentes métricas encontradas na literatura aplicadas ao monitoramento da integridade estrutural pelo método da impedância eletromecânica, procurando identificar características destas diante das aplicações realizadas.

Park e Inman (2005) apresentaram diversas vantagens encontradas na técnica da impedância eletromecânica em relação a outras técnicas de ensaio não-destrutivo. Entre elas podemos citar:

1. Ao contrário da maioria das técnicas baseadas nas respostas vibratórias, a técnica baseada na impedância eletromecânica utiliza altas frequências de excitação, o que possibilita a identificação

de pequenas variações na integridade da estrutura, ou seja, danos que ainda estão em seu estágio inicial;

2. Ao contrário dos testes que utilizam ultra-som, o método da impedância possibilita o monitoramento da estrutura de forma autônoma, sem que haja a necessidade de pessoal com grande experiência para avaliar os dados provenientes do monitoramento;

3. Diferentemente da técnica que utiliza emissão acústica, a limitação da área sensível do método da impedância ajuda no isolamento de variações no sinal da impedância decorrentes de condições normais de operação da estrutura como carga adicionada e vibrações normais de operação.

Outras vantagens da técnica da impedância com relação a outros métodos de identificação de danos são (Park e Inman, 2005):

- A técnica não é baseada em modelos, e com isso pode ser facilmente utilizada

em estruturas complexas;

- A técnica utiliza pequenos atuadores não intrusivos, adequados para monitorar locais de acesso impossível para outras técnicas;

- Os dados resultantes das medições podem ser interpretados facilmente;

- A técnica pode ser utilizada para monitoramento de estruturas em serviço (monitoramento *on-line*);

- A técnica possibilita o monitoramento contínuo de estruturas, o que promove uma melhor avaliação do estado atual da mesma, fazendo com que a manutenção seja baseada em suas condições ao invés de ser baseada em seu tempo de utilização.

2. Material e Métodos

Sabe-se que perda de um rebite e propagação de trinca são danos muito comuns em diversos tipos de estruturas, especialmente nas aeronáuticas. Com o intuito de demonstrar a capacidade da

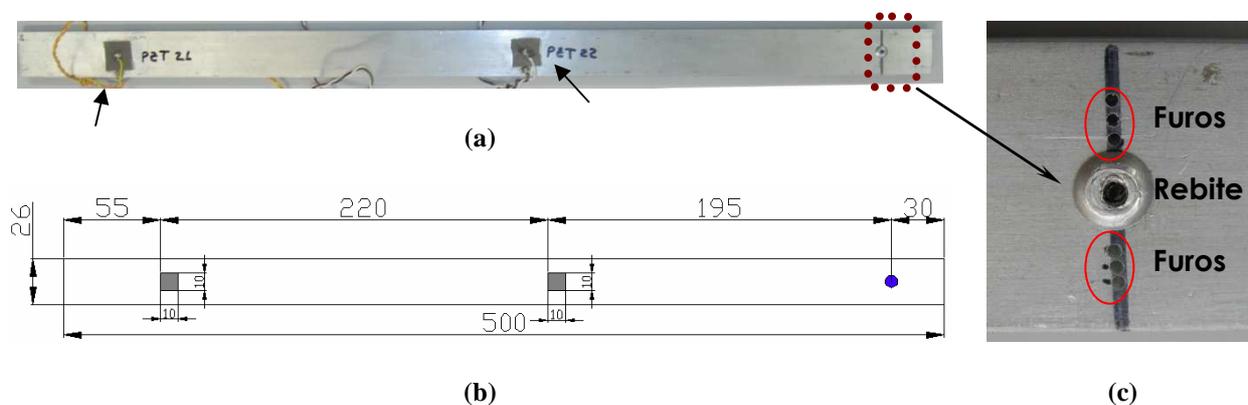


Figura 3 – Configuração da viga: (a) Viga; (b) Dimensões da viga e (c) furos e rebite.

técnica da impedância eletromecânica detectar esses tipos de danos, foram realizados ensaios utilizando uma estrutura tipo viga. Desta forma, um corpo de prova de alumínio com dimensões de 26 x 500 mm e 4 mm de espessura foi confeccionado (Fig. 3(a)).

Nesta viga foram coladas 2 pastilhas de PZT com dimensões de 10 x 10 mm e 0.127 mm de espessura, conforme figura 3(b).

O método comumente utilizado pela indústria aeronáutica para simular a presença de trincas é inserir na estrutura furos de 1 mm de diâmetro próximos uns dos outros. Desta forma, foram feitos seis furos próximos ao rebite, conforme a figura 3(c).

Os sinais foram mensurados no analisador de impedância HP4194A configurado da seguinte forma: OSC level (amplitude da tensão aplicada) = $1 V_{rms}$;

AVG (número de amostras para o cálculo da média) = 16 e pontos de frequência amostrados = 401. Na tabela 1 é apresentado o procedimento adotado no ensaio. Foram utilizadas duas bandas de frequência (30 a 38kHz e 38 a 46kHz) que foram identificadas pelo método da tentativa e erro. Em cada etapa foram obtidas 10 medidas para cada pastilha piezométrica.

As funções de impedância foram processadas no *software* MATLAB® visando a extração de características relacionadas à presença e severidade dos danos inseridos na estrutura construída.

3. Resultados

3.1. Simulação da perda do rebite

Para cada faixa de frequência, foram obtidas as partes reais da função da impedância, e com o auxílio da equação 2, foi possível obter a métrica do dano. As

Tabela 1: Etapas do procedimento experimental.

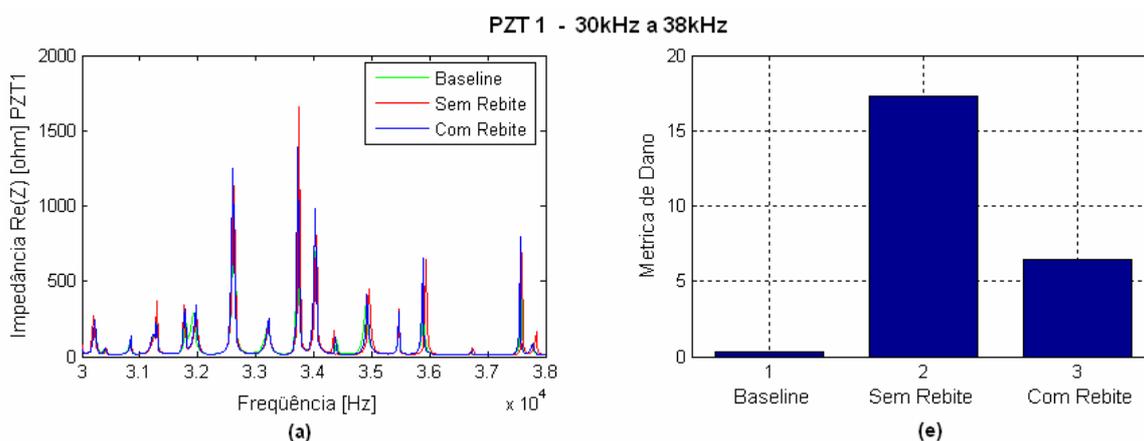
<i>Etapas</i>	<i>Procedimento</i>
1	Obtenção do sinal da função de impedância de referência (baseline).
2	Obtenção do sinal após a retirada do rebite (Sem Rebite).
3	Obtenção do sinal após rebitar a viga novamente (Com Rebite).
4	Falha 1: Fizeram-se três furos de 1 mm em um lado do rebite na viga e obtiveram-se os sinais de impedância.
5	Falha 2: Fizeram-se outros três furos de 1 mm de outro lado do rebite na viga e obtiveram-se os sinais impedância.

métricas geralmente são apresentadas através de um diagrama de caixa ou de um gráfico de barras.

Com o intuito de avaliar as influências de ruídos e variações ambientais presentes nas medições, a métrica do dano foi calculada primeiramente entre os valores das dez medidas sem dano e a média destes valores, de forma que, se o valor da métrica for igual a zero, não houve influência do meio externo nos ensaios. No entanto, mesmo que o valor da métrica para o caso sem dano (*baseline*) não seja igual a zero, se os valores da métrica para os casos com o dano inserido na estrutura forem bem maiores que os valores sem dano, podemos garantir a preponderância da avaria no cálculo da métrica.

Assim, os valores de referência (*baseline*) foram comparados com as funções de impedância adquiridas após a retirada do rebite (*baseline x Sem Rebite*) e com os sinais de impedância após a recolocação do rebite na viga (*baseline x Com Rebite*).

Os gráficos da parte real das funções de impedância para as duas faixas de frequência e para as duas pastilhas piezelétricas são apresentados nas figuras 4(a), 4(b), 4(c) e 4(d), ao passo que os gráficos de barra da média das métricas de dano são mostrados nas figuras 4(e), 4(f), 4(g) e 4(h).



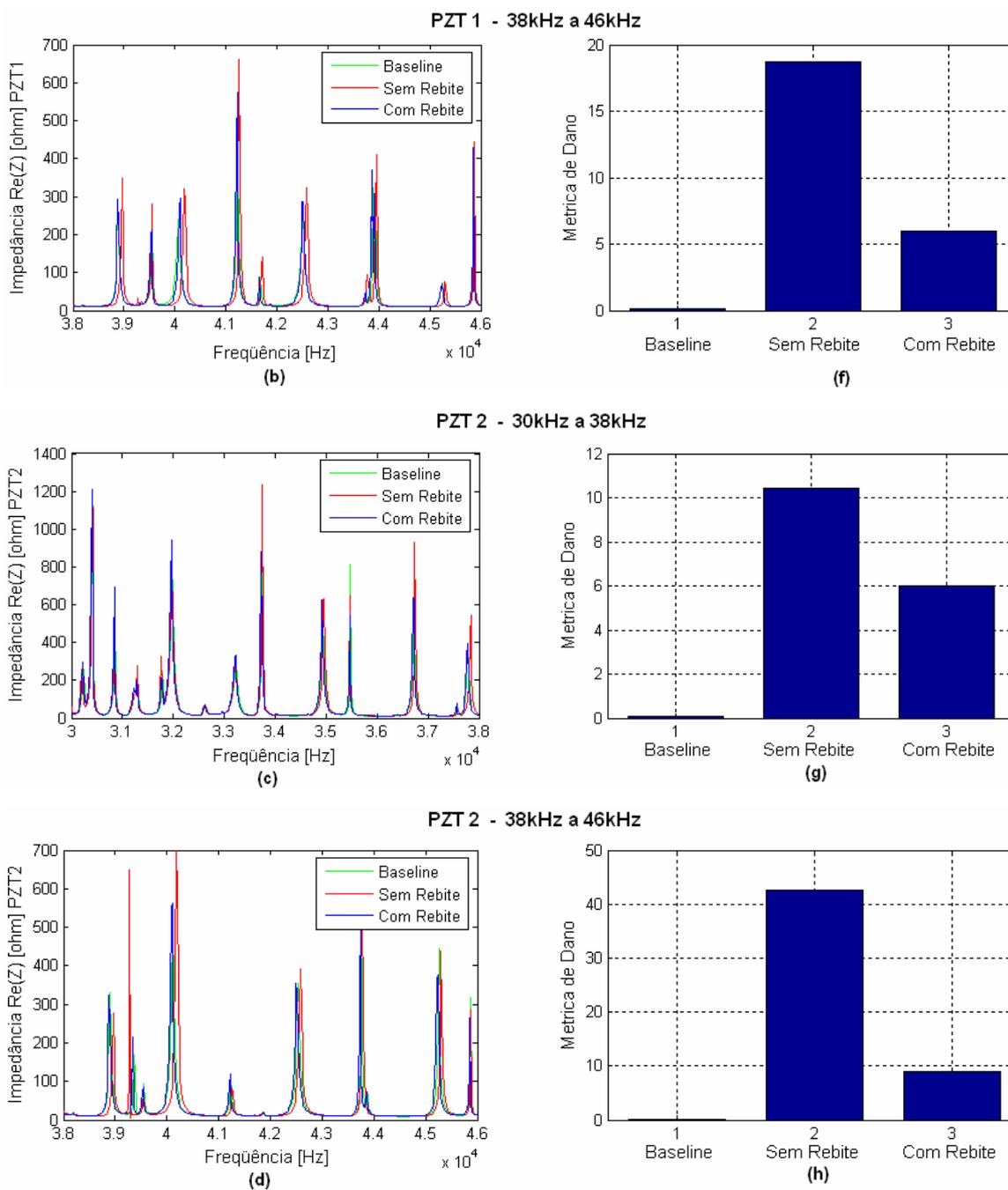


Figura 4: Parte real das funções de impedância e valores das métricas do dano (ensaio rebite).

Comparando as curvas de impedância obtidas antes e após a retirada do rebite, e depois de rebitar a viga novamente, é possível constatar pequenas alterações nos sinais dos dois PZTs nas duas faixas de frequência utilizadas. Desta forma, verificamos que os dois PZTs foram

capazes de detectar a perda do rebite nessas frequências de excitação.

Nos gráficos de barras, os valores das métricas são bem distintos nos três estados, sendo que o maior valor é verificado no estado sem rebite e, após rebitar a viga novamente, o valor da métrica diminui.

Assim, podemos perceber que a técnica utilizada, além de detectar a perda do rebite, indica a severidade do dano ocorrido. O fato da métrica e do sinal da impedância no último estado da viga (em que o rebite é colocado novamente) serem diferentes da métrica e do sinal de referência (*baseline*) pode ter sido ocasionado pela falta de padronização na aplicação do rebite.

3.2. Simulação de trincas

Para este ensaio aplicou-se o mesmo procedimento utilizado na simulação da perda de rebite. A influência dos ruídos e das variações ambientais foram avaliadas. Os valores de referência (*baseline*) foram comparados com as funções de impedância obtidas após a inserção da falha 1 (*baseline* x Falha 1) e com os sinais de impedância após a inserção da falha 2 (*baseline* x Falha 2). Esses danos, conjuntos de três furos com 1 mm de diâmetro, simulam a ocorrência de trincas próximas ao rebite.

Os gráficos da parte real das funções de impedância para as duas faixas de

freqüência e para as duas pastilhas piezelétricas são apresentados nas figuras 5(a), 5(b), 5(c) e 5(d). Os gráficos de barra da média das métricas de dano são mostrados nas figuras 5(e), 5(f), 5(g) e 5(h).

Analisando a curva de impedância de referência (*baseline*) e as curvas com a inserção da falha 1 e com a falha 2, é possível verificar modificações nos sinais obtidos dos dois PZTs nas duas faixas de freqüência adotadas. Por isso, pode-se afirmar que os dois PZTs foram capazes de detectar a inserção da trinca na estrutura utilizada.

Nos gráficos de barras, os valores das métricas tendem a aumentar à medida que se aumenta o dano na estrutura. Assim, da mesma maneira que no ensaio de perda de rebite, nota-se que a técnica adotada, além de detectar a ocorrência de trinca na estrutura, indica a severidade da mesma.

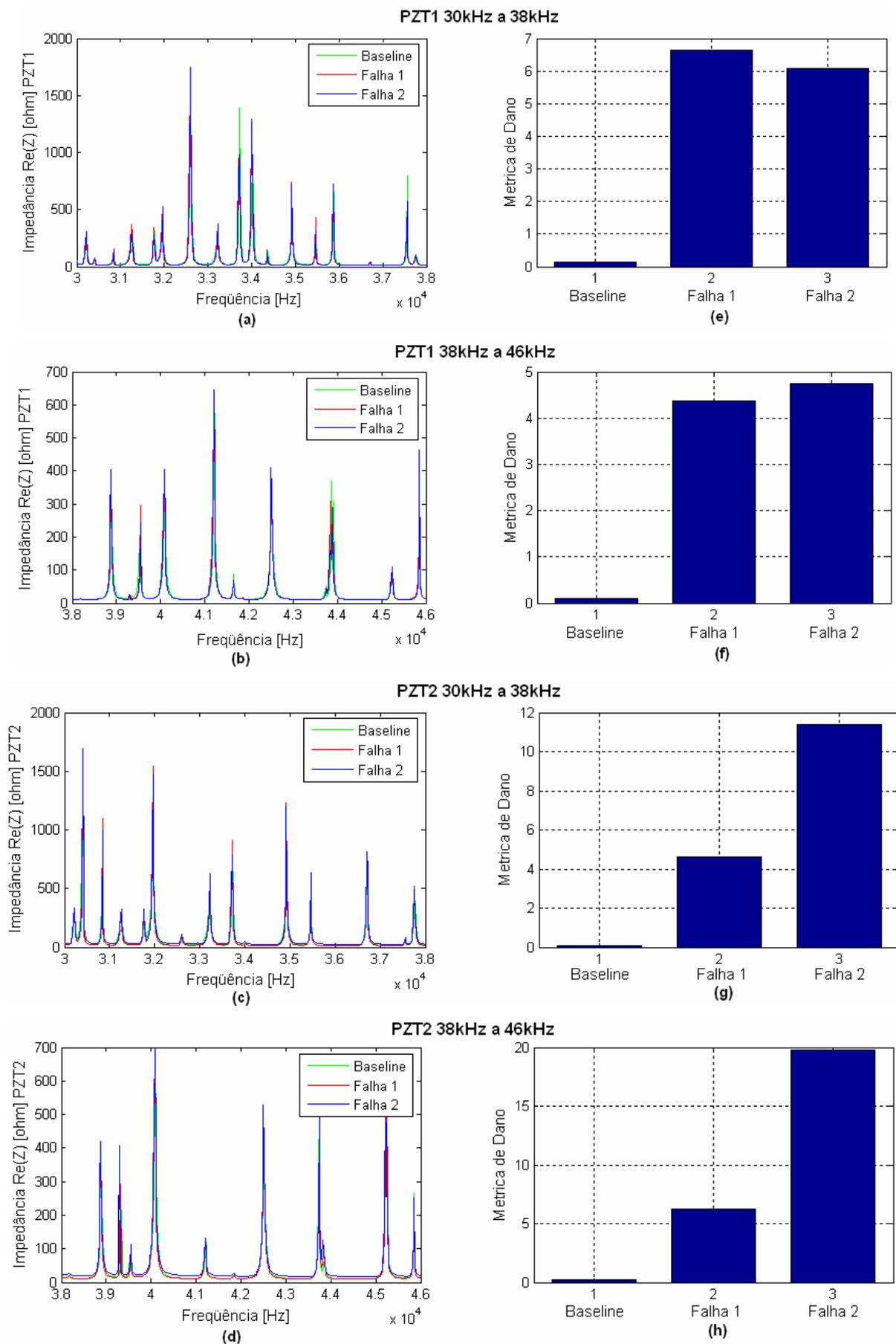


Figura 5: Parte real das funções de impedância e valores das métricas do dano (ensaio trinca).

4. Conclusão

Pode-se concluir que a técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica é eficiente tanto na detecção quanto na indicação da severidade de danos como trincas e perdas de rebite, comuns em estruturas aeronáuticas. Essa técnica proporciona diversas vantagens em relação a outras técnicas tradicionais de ensaio não-destrutivo, mostrando-se adequada para o monitoramento contínuo de estruturas em serviço. Apesar disso, existem diversos desafios que necessitam ser superados até que a técnica seja adotada pela indústria aeroespacial. Entre estes, estão as características do *hardware* e do *software* utilizados para adquirir e processar os sinais de impedância. Os analisadores de impedância utilizados atualmente são pesados e volumosos, impossibilitando seu emprego no monitoramento de aeronaves em serviço. As técnicas de processamento dos sinais de impedância precisam desenvolver para que se torne possível uma caracterização mais precisa do dano, de forma que as decisões relativas à interrupção da operação da aeronave para manutenção sejam tomadas com base nas informações provenientes do sistema de monitoramento.

5. Agradecimentos

O primeiro autor agradece à FAPEMIG pela bolsa de iniciação científica fornecida e à equipe do Laboratório de Mecânica de Estruturas da UFU envolvido na pesquisa, em especial à doutoranda Lizeth Vargas Palomino.

6. Referências

ESTEBAN, J. Modeling of the Sensing Region of a Piezoelectric Actuator/Sensor. PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 1996.

FARRAR, C.R., PARK, G., ALLEN, D.W., TODD, M.D. Sensor Network Paradigms for Structural Health Monitoring. *Journal of Structural Control and Health Monitoring*. 13(1), 210-225, 2006.

FARRAR, C.R., LIEVEN, N.A.J., BEMENT, M.T. An Introduction to Damage Prognosis. In: *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System*. Cap.1, p. 1-12, 2005.

LARSON, J., RUSS, S., *et al.* Engine Rotor Life Extension (ERLE). *Damage Prognosis Workshop*. 2001.

LIANG, C., SUN, F.P., ROGERS, C.A. Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer.

Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 5, 12–20, 1994.

MASSOUD, M. Impedance Methods for Machine Analysis: Modal Parameters Extraction Techniques. Université de Sherbrooke, Quebec, Canada, p. 4-14, 1985.

MOURA JR., J.R.V. Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais. 249f. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 2008.

PALOMINO, L. V. Análise das Métricas de Dano associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para Monitoramento de Integridade Estrutural. 111 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 2008.

PARK, G.; INMAN, D.J. Impedance-based Structural Health Monitoring. In: *Damage Prognosis For Aerospace, Civil and Mechanical System*. Cap.13, p. 275-291, 2005.

PARK, G., SOHN, H., FARRAR, C. R., INMAN, D. J. Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path-Forward. *Shock and Vibration Digest*. Vol. 35, 451–463, 2003.

PEAIRS, D., PARK, G., INMAN, D.J. Improving Accessibility of the Impedance-based Structural Health Monitoring Method. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.15, 129-139, 2004.

SUN, F.P., CHAUDHRY, Z., LIANG, C., ROGERS, C.A. Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. vol. 6, 134–139, 1995.

TSURUTA, K. M. Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica da Impedância Eletromecânica. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 2008.

WORDEN, K., DULIEU-BARTON, J. M. An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. *Structural Health Monitoring*. vol. 3, 85-98, 2004.