



## MONITORAMENTO UTILIZANDO A TÉCNICA DE ONDAS DE LAMB PARA DETECÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Jessica Guarato de Freitas Santos<sup>1</sup>

Denner Miranda Borges<sup>1</sup>

Roberto Mendes Finzi Neto<sup>1</sup>

Lucas Altamirando de Andrade Rocha<sup>1</sup>

jessica.guarato@ufu.br

dennermiranda@ufu.br

finzi@ufu.br

lucasarocha@ufu.br

<sup>1</sup>LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, 38408-196, Brazil.

**Resumo:** O Monitoramento de Integridade Estrutural permite a detecção de alterações em estruturas, possibilitando a identificação e o nível de dano causado. A técnica baseia-se na utilização de materiais piezoelétricos para excitação mecânica e coleta de sinais na estrutura com e sem danos. Na abordagem por Ondas de Lamb são observados os fenômenos de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos. Possíveis danos são identificados por métodos comparativos entre as assinaturas obtidas. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a eficácia da técnica de Ondas de Lamb, pela metodologia pitch-catch, utilizando uma viga de alumínio. Na análise são executados experimentos utilizando transdutores piezoelétricos acoplados à estrutura em alumínio citada. Os experimentos submeteram a estrutura à variação de temperatura e à inclusão de danos progressivos simulados. A partir das assinaturas características para os casos ensaiados, um modelo estatístico é empregado para identificar a presença do dano simulado, sendo estabelecida uma correlação da temperatura ensaiada na precisão e confiabilidade da técnica de Ondas de Lamb para o monitoramento de integridade estrutural.

**Palavras-chave:** Monitoramento de integridade estrutural, Ondas de Lamb, Vigas, Detecção de danos.

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas mecânicas estão sujeitas a regimes de trabalho que podem levar ao desgaste do material, e que eventualmente ocasionam sua falha ou colapso. No caso de estruturas que exigem alto grau de confiabilidade como lâminas de turbinas, e componentes estruturais de aeronaves e satélites, a manutenção constante, seja preventiva ou corretiva, destes componentes é essencial para garantir o pleno desempenho operacional. Assim, a manutenção destes componentes estruturais muitas vezes requer que sua operação seja suspensa até o final do processo. Para os operadores, o tempo fora de serviço acarreta em custos operacionais maiores e por vezes desnecessários, já que o componente pode apresentar um dano estrutural que não inviabilizaria sua operação.

Neste contexto o processo de monitoramento da integridade estrutural de um componente, permite a detecção e quantificação do dano na estrutura, de modo que o componente não precise efetuar uma parada na sua operação, ou que esteja numa condição de operação segura para danos incipientes.

A premissa básica para os métodos de detecção de danos é de que a presença deste irá causar alterações nos parâmetros de rigidez, massa ou de dissipação de energia na estrutura, de modo que isto afete sua resposta dinâmica medida (Sohn *et al*, 2003). A técnica de monitoramento por Ondas de Lamb, consiste no uso de transdutores piezoelétricos acoplados mecanicamente a estrutura para enviar e receber ondas mecânicas que se propagam no meio elástico desta. A abordagem *pitch-catch* utiliza um par de sensores localizados na extremidade da estrutura que atuam separadamente com atuador e sensor, desta forma alterações decorrentes de modificações estruturais, como um provável dano, irão afetar a resposta da onda medida (Leucas, 2009).

Os sensores piezoelétricos utilizados para a técnica são bastante sensíveis quanto a temperatura ensaiada, o que pode acarretar erros no processo de monitoramento. Neste sentido, o presente trabalho apresenta um estudo da técnica de Ondas de Lamb para detecção de danos simulados em uma viga de alumínio. Os ensaios são realizados em temperaturas controladas por uma câmara climática, de tal modo a analisar a influência deste fator sobre os resultados gerados. A estrutura foi ensaiada para simular problemas comuns em sistemas mecânicos, tais como, perda de aperto em parafusos e perda de rebites. Desta forma, neste estudo, os danos consistiram na perda progressiva de aperto em um parafuso afixado a viga.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia de Ondas de Lamb é uma das técnicas utilizadas na detecção de danos no processo de monitoramento de estruturas. Esta técnica tem provado ser um método confiável para estimar a existência de dano em uma estrutura em termos de localização, severidade e tipo de dano (Raghavan e Cesnik, 2005). Basicamente as Ondas de Lamb consistem em ondas elásticas que se propagam por meios sólidos, estando assim sujeitas a atenuações e reflexões impostas pelo meio em questão. A presença de um dano, ou outro fator externo, altera o meio de propagação, modificando os parâmetros característicos da onda.

Raghavan e Cesnik (2005) definem dois métodos principais para a utilização desta metodologia:

1. Método *pitch catch*: consiste no uso de dois sensores operando separadamente como atuador e sensor. Deste modo um sinal pulsado é enviado de uma extremidade a outra na estrutura. Na presença de um dano essa propagação é alterada, tornando possível a determinação do mesmo.

2. Método pulse-eco: um único material piezoelétrico age como sensor e atuador excitando a estrutura. O sinal adquirido é devido a reflexões na propagação da onda. A presença de um dano altera o padrão anterior de reflexão, tornando possível a identificação.

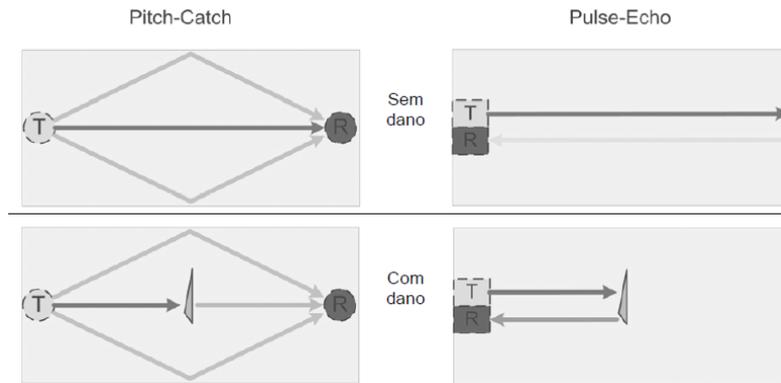


Figura 1. Principais técnicas para o diagnóstico por ondas de Lamb (Leucas, 2009)

Em ambas abordagens, são utilizados algoritmos de processamento digital de sinais para extrair informações referentes ao meio de propagação do sinal adquirido. Neste sentido, são utilizadas ferramentas de processamento como a Transformada Rápida de Fourier (TRF) para obter informações no domínio da frequência ou a Transformada de Wavelet Contínua (TWC) que relaciona as escalas de energia do sinal no domínio do tempo.

O presente trabalho utiliza a TWC para extração das características do sinal, como adotado por outros autores (Raghavan *et al.*, 2005; Leucas, 2008). A Transformada de Wavelet Contínua pode ser vista como a relação das escalas de energia de um determinado sinal em função do tempo. Toda a análise da TWC é baseada em formas de onda chamadas *wavelets* mãe. Existem diversas formas de *wavelets* mãe, para aplicações em diversas áreas. Neste estudo a *wavelet morlet* que fornece informações tanto da amplitude como da fase foi utilizada.

Com a *wavelet* mãe escolhida, o sinal no tempo  $x(t)$  da onda é decomposto por convolução no tempo em um conjunto de funções base, que são obtidas através da dilatação e compressão da onda mãe  $\psi(t)$ , conforme a Eq. 1:

$$TWC_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

onde as variáveis  $a$  e  $b$  são os parâmetros de escala e translação respectivamente, de forma que a escala se relaciona com a frequência e a translação com o tempo.

A partir do sinal processado pela TWC é possível relacionar a escala correspondente à frequência de excitação usada na estrutura. A literatura estudada sugere que a frequência de excitação seja próxima às frequências naturais da estrutura, de modo que uma grande parcela de energia do sinal gerado seja entregue a estrutura.

As técnicas de monitoramento de integridade estrutural são inerentemente experimentais. A identificação de um dano se dá devido a comparação da assinatura do sinal de uma estrutura conhecida, *a priori* sem um dano (*baseline*), com a mesma estrutura na presença de um dano. De tal modo, para quantificar as assinaturas dos sinais *baseline* e de teste

(sinal a ser analisado), são utilizadas métricas de dano para obtenção de valores quantitativos. A métrica mais usual para a técnica de ondas de lamb é o chamado DI (*Damage Index*), definido como apresentado na Eq. 2:

$$DI = 1 - \frac{\int_{b_1}^{b_2} TWC_{teste}(b, a_0) db}{\int_{b_1}^{b_2} TWC_{baseline}(b, a_0) db} \quad (2)$$

Onde  $a_0$  é a escala da TWC que corresponde à frequência de excitação, e os sub-índices *teste* e *baseline* denotam o valor a ser comparado entre o sinal testado e de referência, respectivamente. Desta forma o valor da métrica se encontra sempre no intervalo  $0 \leq |DI| \leq 1$ .

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A estrutura ensaiada consiste de uma viga de alumínio comum de dimensões (500 mm x 50 mm x 3 mm) com um parafuso sextavado de dimensões (30 mm x 3/16") afixado com uma porca no centro da viga. O material piezoelétrico utilizado para o monitoramento da estrutura é o titanato zirconato de chumbo (PZT), de forma circular com 30 mm de diâmetro. A colagem do PZT na estrutura foi feita através de uma cola do tipo epóxi com tempo de cura de aproximadamente um dia.

Foram simulados vários níveis de dano na viga metálica, que consistem no desaperto do parafuso afixado em 1/8 de volta, 1/4 de volta e perda total do parafuso. Inicialmente, o parafuso foi apertado com torque inicial de 6 N.m, A Fig. 2 ilustra a viga com os PZT's acoplados, e o parafuso afixado. Os ensaios foram realizados na condição livre-livre, para tal a viga foi apoiada sobre duas borrachas.



**Figura 2. Estrutura ensaiada na câmara climática**

Os equipamentos que foram utilizados nos ensaios consistem de:

- Câmara climática (EPL-4H) com estabilização de temperatura (-40°C a 160°C);
- Equipamento de geração e aquisição de dados (*National Ins.* PXI-5412 e PXI-5105);
- Programa em LabView® para geração e coleta de sinais desenvolvido no LMEst (Laboratório de Mecânica de Estruturas);
- Código desenvolvido em MATLAB® para análise de dados.

Todos os ensaios foram realizados sob temperaturas controladas. As temperaturas definidas foram 5°C, 22°C e 50°C. Os parâmetros de configuração do programa consistem na geração de uma onda do tipo *morlet* com três períodos e meio, 10 V pico de amplitude e 11 kHz de frequência. Foram coletadas 100 amostras para cada configuração de *baseline* e três tipos de dano, e para cada temperatura analisada.

#### 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Afim de garantir a confiabilidade dos resultados gerados pelos processos de monitoramento de integralidade estrutural, é fundamental o emprego de técnicas estatísticas que viabilizem a análise do grande volume de dados obtidos. Uma forma conveniente e bastante utilizada de representar as diferenças nos dados das amostras é através dos gráficos de caixa, conhecidos como *boxplots*.

O gráfico é composto de uma caixa central definida pelo primeiro e terceiro quartis (intervalos que contêm 25% das amostras) e que englobam a mediana das amostras em destaque. Além disso o gráfico possui os chamados “bigodes” que definem a distância de 1,5 vezes o intervalo interquartil IQR (diferença entre o terceiro e primeiro quartis) da caixa central. A Fig. 3 apresenta a construção de um *boxplot* típico, assim como os desvios padrão envolvidos na divisão de dados.

De tal forma, os dados relativos aos índices de dano (DI) para cada uma das 100 amostras realizadas para estrutura sem dano, e para as três configurações de dano citadas, são organizados em gráficos *boxplot*, afim de assegurar a confiabilidade estatística dos resultados.

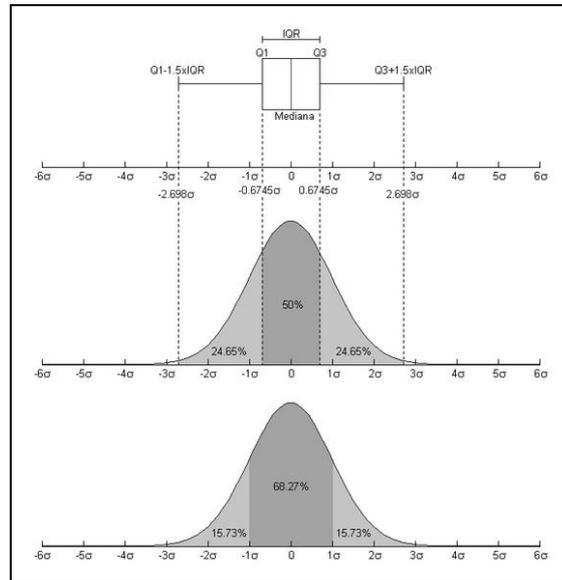


Figure 3. Construção de um *boxplot* típico e sua dispersão de dados (Leucas, 2009).

##### 4.1 Temperatura de 22°C

Para a temperatura ambiente (22°C) ensaiada em condições controladas na câmara climática, os dados obtidos para os índices de dano das amostras são apresentados na Fig. 4:

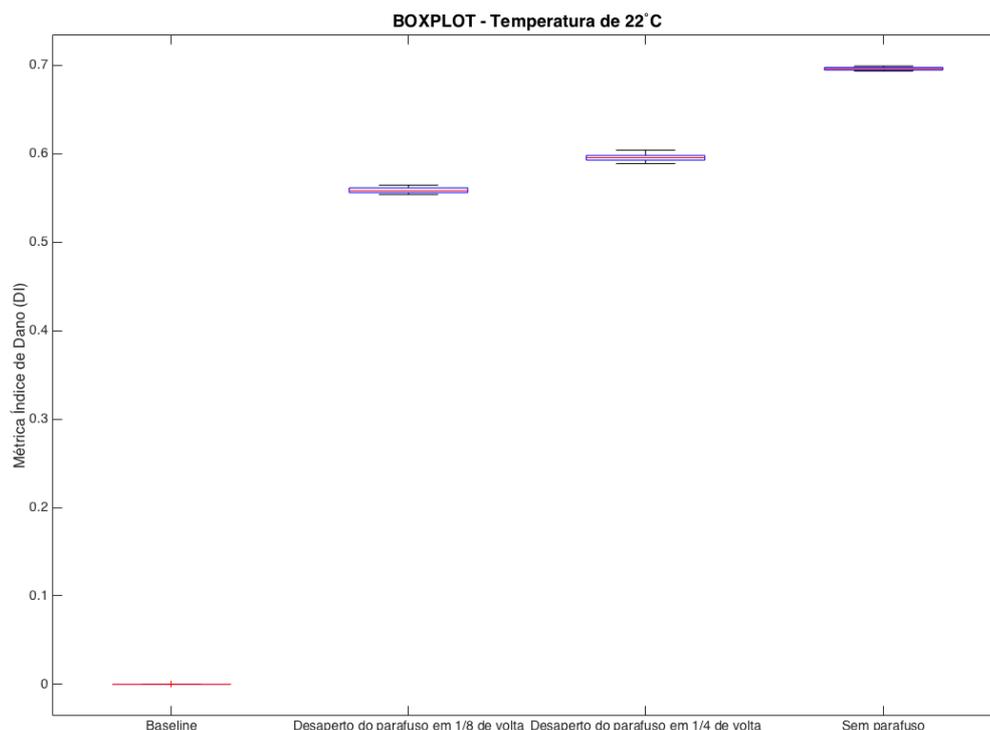


Figura 4. Boxplot para os índices de dano nas configurações ensaiadas ( $T=22^{\circ}\text{C}$ )

Nesta condição de temperatura ambiente, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Foi gerado um gráfico *boxplot* das *baselines*, para comparar os valores de DI para as diferentes medições realizadas, uma vez que pequenas diferenças ocorrem entre estas. Como esperado, a média do índice de dano para as *baselines* é aproximadamente nula. Já, os valores de DI para os danos simulados são bem distintos de zero, o que indica uma boa sensibilidade do método para a detecção de um dano. Nota-se ainda que para uma maior severidade de dano (perda total do parafuso), têm-se um aumento considerável no índice, o que demonstra a capacidade de quantificar o nível de dano presente na estrutura.

#### 4.2 Temperatura de 5°C

Na temperatura ensaiada de 5°C os dados obtidos para os índices de dano das amostras são apresentados na Fig. 5. É observado com a redução da temperatura a mudança nos índices de dano para as condições simuladas. A maior discrepância comparada à temperatura ambiente ocorre para desaperto do parafuso em 1/4 de volta, que se aproxima da condição de perda total do parafuso. Os valores de DI para as configurações simuladas nesta temperatura, ainda sim apresentam uma boa sensibilidade para detecção de dano.

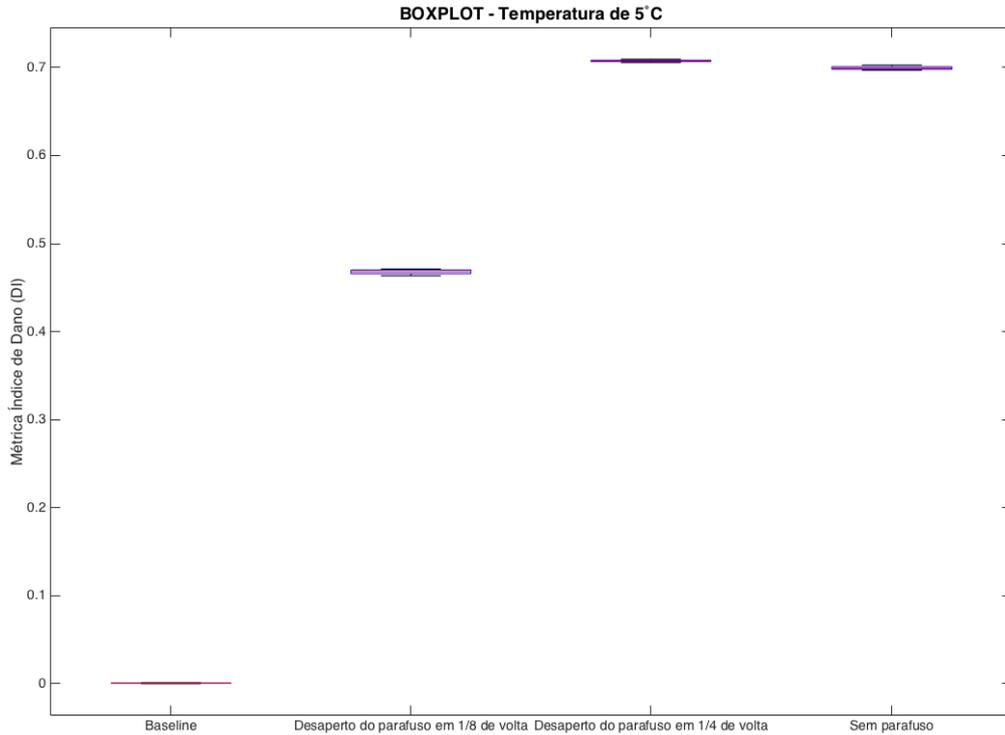


Figura 5. Boxplot para os índices de dano nas configurações ensaiadas ( $T=5^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.2 Temperatura de $50^{\circ}\text{C}$

Para a temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$  ensaiada, os dados obtidos para os índices de dano das amostras são apresentados na Fig. 6:

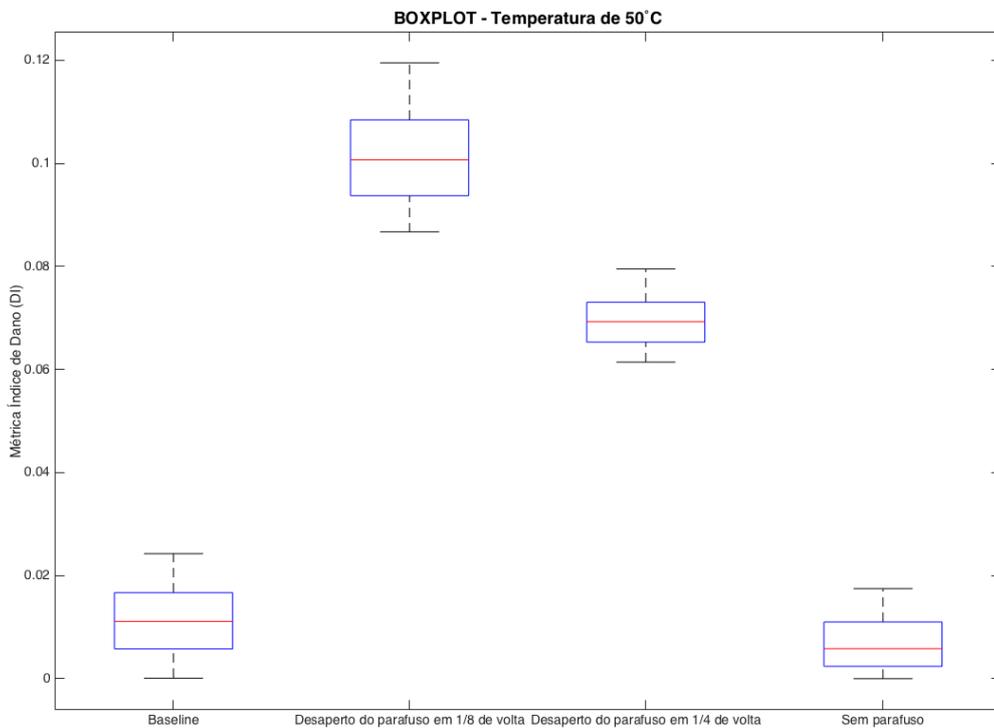


Figura 6. Boxplot para os índices de dano nas configurações ensaiadas ( $T=50^{\circ}\text{C}$ )

Nesta condição de temperatura ocorrem as variações mais drásticas nos índices de dano. É notado que a escala para o DI é significativamente menor do que a obtida nas condições anteriores, não sendo possível determinar com clareza a presença dos danos inseridos na estrutura. Na condição de perda total do parafuso pouca diferença em relação as métricas de *baseline* é observada. Os danos simulados com o parafuso ainda afixado a estrutura também são inconsistentes comparados as métricas anteriores.

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, um estudo acerca do uso da técnica de Ondas de Lamb para detecção de danos em uma estrutura metálica foi realizado. As análises foram efetuadas sob condições climáticas controladas, para verificar o efeito da temperatura nos resultados. A técnica apresenta boa sensibilidade a identificação dos danos simulados na estrutura, sendo possível quantificar a evolução do dano através de métricas comparativas entre os sinais da estrutura saudável e testada.

Afim de analisar a influência da temperatura acerca das condições simuladas, foram efetuadas medições em três temperaturas distintas. Verificou-se pelos resultados que a técnica sofre grande influência de fatores climáticos, como a variação de temperatura, estudada neste trabalho. Para as condições ensaiadas notou-se que com um maior gradiente de temperatura em relação às condições ambientes, menos confiáveis e precisos apresentam-se os resultados. Sendo assim, são necessárias táticas de compensação de temperatura para que a análise apresente um resultado satisfatório.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPQ, e a CAPES pelo apoio financeiro e a Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte técnico prestado neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Addison, P. S., 2002, *The Illustrated Wavelet Transform Handbook – Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*, Taylor and Francis, 1<sup>st</sup> edition, USA.
- Debnath, L., 2001, *Wavelet Transforms & Their Applications*, Boston, MA, USA, Birkhäuser Press.
- Giurgiutiu, V., Zagrai, A., Bao, J.J., 2002, Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring. *International Journal of Structural Health Monitoring*. Vol. 1. p. 41–61. 2002.
- Leucas, L. F. Utilização das Técnicas de Impedância Eletromecânica e Ondas de Lamb para Identificação de Dano em Estruturas com Rebites. 2009. 68 f. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C., 2003, *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. ISBN: 8521613601
- Park, G., Kabeya, K., Cudney, H. H., Inman, D. J., 1999. Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. *JSME International Journal*, vol. 42, n. 2, pp. 249-258.

Raghavan, A., Cesnik, C. E. S., 2005, Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring. *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System*, Wiley, Cap. 11, pp.235-274. 2005.

Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R. A, 2003, *Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001*, Los Alamos National Laboratory, USA.