

SHM BASEADO EM ONDAS DE LAMB E MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O LIMIAR DE DETECÇÃO DE DANO APLICADO A ESTRUTURAS DE AERONAVES

Lucas Altamirando de Andrade da Rocha, Universidade Federal de Uberlândia, lucasaarocha@ufu.br
Roberto Mendes Finzi Neto, Universidade Federal de Uberlândia, finzi@ufu.br
Valder Steffen Jr, Universidade Federal de Uberlândia, vsteffen@ufu.br

Resumo: O método baseado nas ondas de Lamb tornou-se uma ferramenta promissora para a identificação de danos e é considerado como sendo uma técnica de avaliação não destrutiva. Estudos convencionais têm focado, principalmente, na identificação de danos estruturais, mas não tanto sobre modelagem estatística para determinar um limiar para a tomada de decisão do sistema de detecção de dano. Neste estudo, a técnica de ondas de Lamb é utilizada na detecção de danos considerando os efeitos da variação da temperatura. Para este objetivo, foi utilizada uma placa de alumínio 2024-T3 instrumentada com PZT's na configuração Pitch-Catch e com a temperatura variando de $25 \pm 3^\circ\text{C}$. Assim, este trabalho propõe um método para determinar estatisticamente um limite para fins de detecção de danos usando conceitos de Controle Estatístico de Processos, com o objetivo de obter um diagnóstico dentro de um dado nível de confiança. Apresenta-se uma avaliação da sensibilidade da técnica de ondas de Lamb quando aplicada a placas de alumínio sob condições de temperatura variável. Com a técnica proposta, os níveis de limite de dano são determinados de modo que as pastilhas de PZT são capazes de identificar o dano inserido entre eles, sendo este caracterizado pela norma de avaliação não destrutiva, com intervalos de confiança de 95% dentro da gama de temperaturas considerado.

Palavras-chave: : Análise de monitoramento estrutural (SHM), ondas de Lamb (Lamb Wave - LW), determinação de threshold, análise estatística.

1. INTRODUÇÃO

Quando implantado, o sistema de SHM terá que lidar com estruturas que experimentam mudanças nas condições operacionais e ambientais. Estas mudanças nas condições operacionais e de avaliação produzirão mudanças na resposta medida e é imperativo que essas mudanças não sejam interpretadas como indícios de danos (falsos positivos). A variação da temperatura ambiente é uma condição comum que deve ser contabilizada durante o processo de detecção de danos (Inman et al, 2005).

Um exemplo em sensoriamento local ativo para detecção de danos usando sensores de PZT é o método baseado nas ondas de Lamb (Sohn et al., 2004, Paget et al., 2003, Kessler et al. 2003, Wang et al., 2003). Características vantajosas destes transdutores incluem: são de baixo custo; exigem geralmente baixo consumo de energia; é uma técnica não-intrusiva; e têm uma ampla gama operacional de frequências, proporcionando alta sensibilidade para os sensores. O método das ondas de Lamb monitora as ondas mecânicas elásticas que trafegam na estrutura carregando informação da existência de danos ao longo de seu trajeto. Embora algumas propriedades piezoelétricas sejam dependentes de mudanças de temperatura, existem técnicas de compensação que podem mitigar estes efeitos. Efeitos da variação de temperatura e procedimentos de compensação têm sido amplamente estudados (Kijanka et al., 2013; Harley et al., 2012; Rocha et al., 2014).

A estatística no processo de tomada de decisão é uma das principais ferramentas de um sistema de SHM. Embora as ondas de Lamb sejam tipicamente usadas para identificação de danos estruturais (Su et al., 2006 e 2009; Ramadas et al., 2011; Monnier et al., 2006; Lu et al., 2009; Park, 2007; Sorohan et al., 2011), a maioria dos estudos fazem uso limitado de modelos estatísticos. Um dos objetivos dos modelos estatísticos em SHM é o de minimizar os diagnósticos falsos.

Este artigo investiga a utilização de pastilhas de PZT (sensores/atuadores piezoelétricos) para detectar uma modificação estrutural representada pela adição de massa (simulação de dano), seguindo a norma de avaliação não destrutiva feita em uma placa de alumínio 2024-T3 (material normalmente utilizado em aeronaves), considerando-se um intervalo de temperatura de 3°C em torno da temperatura base de 25°C . Evidentemente, a escolha deste intervalo de temperatura não corresponde a todo o intervalo de temperatura de uma superfície de asa de avião (-55 a 80°C), no entanto, permite ilustrar a metodologia proposta. O valor da massa adicionada foi sequencialmente aumentado. A técnica de identificação de dano (Damage Index – DI) definida por (Sohn, 2005) utiliza uma comparação entre a energia do *baseline* (estrutura sem dano) com os demais sinais processados da estrutura em monitoramento. Estudos recentes têm utilizado esta técnica e uma revisão dos diferentes métodos é apresentada na literatura (Rocha et al., 2013). Em seguida, um modelo estatístico foi desenvolvido para determinar os índices de limiar de dano de acordo com um nível de confiança pré-definido. Assim, este trabalho fornece uma avaliação da sensibilidade da técnica ondas de Lamb considerando a taxa de sucesso, a fim de detectar os danos inserido para placas de alumínio sob condições de temperatura variável.

2. Ondas de Lamb baseados para SHM

Nesta secção, o princípio em que a técnica das ondas de Lamb se baseia é discutido juntamente com a metodologia segundo a qual os danos estruturais são detectados. Além disso, são discutidos brevemente os problemas relacionados à variação de temperatura.

2.1. Princípio físico da técnica LW

Basicamente, ondas Lamb são ondas elásticas que se propagam por meios sólidos e, desta forma, estão sujeitas às atenuações e reflexões impostas por este meio de propagação.

Ao se considerar uma estrutura como sendo o meio de propagação, quando se insere um dano nesta estrutura também é alterado o meio de propagação e, desta forma, pode-se identificar o dano. Esta técnica tem provado ser um método confiável para estimar a existência de dano em estruturas, envolvendo sua localização, severidade e tipo de dano (Raghavan e Cesnik, 2005).

Raghavan e Cesnik (2005) definem dois métodos de diagnóstico habituais associados com a técnica de LW a saber: o método de pulse-echo e o método pitch-catch. Em ambos os métodos o atuador excita a estrutura com um sinal de pulso, geralmente um único tom modulado na Hann 3,5. No método de pulse-echo o mesmo atuador é utilizado como um sensor para monitorizar os ecos deste sinal ao longo do caminho de propagação. Na abordagem pitch-catch o sinal de impulso é gerado por um atuador e se propaga através da estrutura; em seguida, um sensor localizado num local diferente da estrutura recebe o sinal (Raghavan e Cesnik, 2005).

Ambas as metodologias fazem uso de algoritmos de processamento digital de sinais a fim de se extrair características referentes ao meio de propagação do sinal adquirido. Sendo assim, pode-se, por exemplo, utilizar a Transformada Rápida de Fourier visando detectar frequências características (Lemistre et al, 1999), ou ainda utilizar a Transformada Wavelet Contínua (TWC) para se extrair as características necessárias (Sohn, 2005), dentre outras. O presente trabalho utiliza TWC para extração das características do sinal (Debnath, 2001), sendo que o método de diagnóstico aqui utilizado é o pitch-catch. Esta metodologia tem sido aplicada com sucesso nos casos de identificação de delaminações e rupturas de fibras em estruturas compostas com fibras de carbono/epóxi (Lemistre et al., 1999). Acrescenta-se que esta técnica pode ser igualmente aplicada em estruturas metálicas, tais como falhas em trilhos de ferrovia (Park, 2001) ou ainda em placas metálicas (Huynh, 2005).

Desta forma, a Fig.1 esquematiza a metodologia utilizada no presente trabalho, partindo de uma excitação pulsada em uma dada frequência, até a decomposição do sinal em frequências através da TWC.

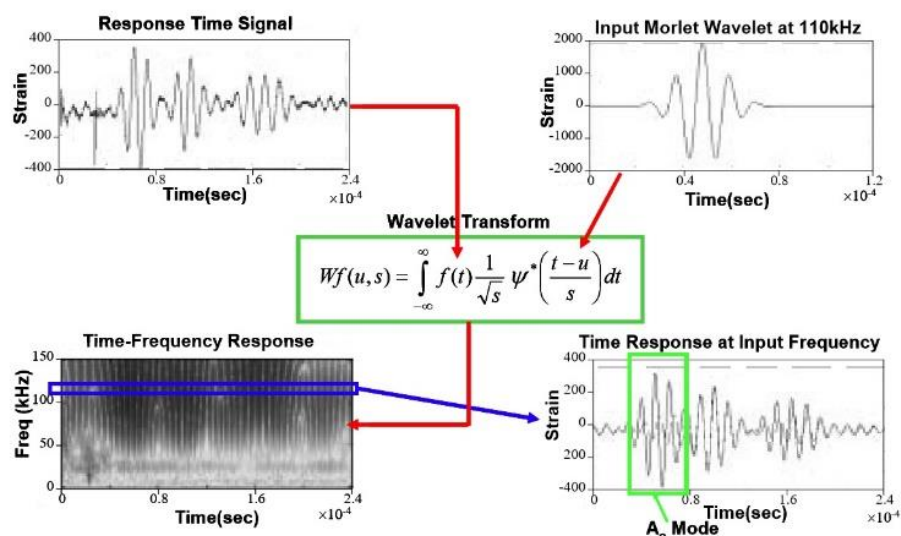


Figura 1: Procedimento para extração de características de dano através da análise por TWC.

Definido o sinal de entrada e após excitar a estrutura, o sinal então adquirido é processado através da TWC, levando à obtenção de um escalograma que representa o sinal no plano escala-tempo. Seleciona-se então a escala correspondente à frequência de excitação e obtém-se o sinal filtrado que carrega as características de propagação do meio físico. A partir deste sinal, define-se a região de análise.

Assim, analisando a janela de dados e procurando o pico do sinal, pode-se definir o tempo em que ocorre o chamado TOF (Time of Flight) e o valor do pico dado neste momento. Além disso, a energia do sinal pode ser utilizada para caracterizá-lo (Sohn, 2005). Pelo fato de que este sinal é classificado como transiente, ferramentas de análise transiente, tais como a TWC é utilizada para extrair mais informações dos dados adquiridos, especialmente para isolar a frequência de entrada (Wang e Chang, 2000).

2.2. Índice de dano

É possível determinar um valor quantitativo associado ao dano. Um dos índices mais utilizados é o chamado Índice de Danos (*Damage Index* – DI) (Sohn, 2005; Lu et al., 2009) que utiliza uma comparação entre a energia da baseline e os sinais processados por TWC (Lu et al., 2009; Abbate et al., 1997; Lind et al., 2001; Farrar et al., 2005). A formulação para esta métrica é dada pela Eq. (1).

$$DI = 1 - \frac{\int_{x1}^{x2} Wft(x, S_0) dx}{\int_{x1}^{x2} Wfb(x, S_0) dx} \quad (1)$$

onde

$Wft()$ Transformada de Wavelet do sinal testado;

$Wfb()$ Transformada de Wavelet do sinal da baseline;

x tradução da wavelet utilizada em TWC;

S dilatação da wavelet utilizada em TWC;

$x1$ e $x2$ intervalos de tradução (ligada ao tempo) analisados pela TWC.

A sensibilidade desta técnica depende da frequência de excitação selecionada, da amplitude aplicada, além do período da onda de Lamb. No entanto, este método utiliza apenas um canal de entrada para gerar o *tone burst* e depois disso o sinal é analisado.

2.3. Influência da temperatura na LW

Há uma série de efeitos relacionados com a temperatura que afetam o desempenho de um sistema baseado em LW para SHM. Alguns deles estão relacionados com a dependência da temperatura observada em alguns parâmetros e propriedades do acoplamento adesivo dos transdutores. Estes efeitos podem ser geralmente verificados como uma variação na amplitude do sinal. No entanto, apenas fenômenos que contribuem para a dependência da temperatura da propagação da LW são aqui considerados; isto é, a expansão térmica ou contração que altera a distância de propagação e aparece como uma mudança de velocidade da onda.

Neste estudo, a dependência da temperatura é ressaltada mostrando que uma variação pequena de temperatura pode influenciar no procedimento, levando a uma falsa interpretação. Embora o presente trabalho não aborde a técnica de compensação de temperatura, seu efeito fica bem evidente e é um fator crucial na tomada de decisão sobre a existência de dano na estrutura.

3. PROJETO EXPERIMENTAL E CONFIGURAÇÃO

O foco deste trabalho está na preocupação quanto à incerteza sobre a existência ou não de danos estruturais (minimizando os falsos negativos e falsos positivos). Para a técnica de LW, exemplos de variáveis de processo são a banda de frequência a ser escolhida ao excitar o corpo de prova, os transdutores piezoelétricos, o dispositivo de medição, o procedimento de colagem do sensor, as condições ambientais e operacionais, etc. A incerteza do processo NDE é representada por uma matriz de teste contendo diferentes inspeções a serem realizadas no conjunto completo de amostras (Ginzel, 2006).

Assim, a placa de alumínio 2024-T3, com dimensões de 500x500x1,6 mm e massa de 1.120 kg foi instrumentada com duas pastilhas de PZT (diâmetro de 15 mm x 0,5 mm espessura, do tipo 5H). Os sensores-atuadores de PZT foram colados com um adesivo à base de epoxi (Hysol EA9320NA). O corpo de prova foi preparado conforme ilustra a Fig. 2(a). A fim de introduzir os danos foi seguido a norma MIL-HDBK 1823A que utiliza a adição de massa (Fig. 2(b)) para simular diferentes níveis de danos na estrutura, segundo Farrar (2005). O procedimento da medição de ondas de Lamb foi descrito por Farrar (Farrar et al., 2005). A frequência de excitação foi escolhida experimentalmente. Este procedimento é tipicamente utilizado quando não é possível modelar o corpo de prova (muito complexo). A mesma técnica foi adotada para generalizar sua aplicação, ou seja, a frequência de 30 kHz foi adotada com a modulação Hann 3.5 (Sohn, 2005), amplitude de 10 V_{pp} , e foi utilizado o PXI-5412 para gerar a onda e o PXI-5105 para capturar a onda incidente no sensor piezoelétrico com taxa de amostragem de 30M/s consideradas 30 mil amostras.

O experimento foi realizado no interior da câmara climática (EPL-4H) (Fig.2(c)) com resolução de 0,1 °C, onde a temperatura variou conforme 25 ± 3 °C. O tempo para estabilizar a temperatura no interior da câmara climática foi definida em 45 minutos segundo Incropera (Incropera et. all, 2006).

Assim, com a temperatura estável, foi realizada a aquisição da baseline da estrutura saudável nas temperaturas alvo, seguindo a norma MIL-HDBK 1823A foram introduzidos danos graduais em 4 níveis que consiste na adição de um *stick patch*, respeitando o tempo entre as adições de danos para a temperatura estabilizar segundo Incropera (Incropera et. all, 2006). Foram adquiridos 500 sinais para cada situação com intervalo de 500ms entre cada aquisição.

É importante mencionar que foram adotados vários procedimentos para minimizar efeitos de ruído na coleta do sinal, além de sincronizar os sinais com algoritmo de *trigger* (Tseng et al., 2002) no sinal aplicado no PZT atuador para não interferir nos sinais coletados.

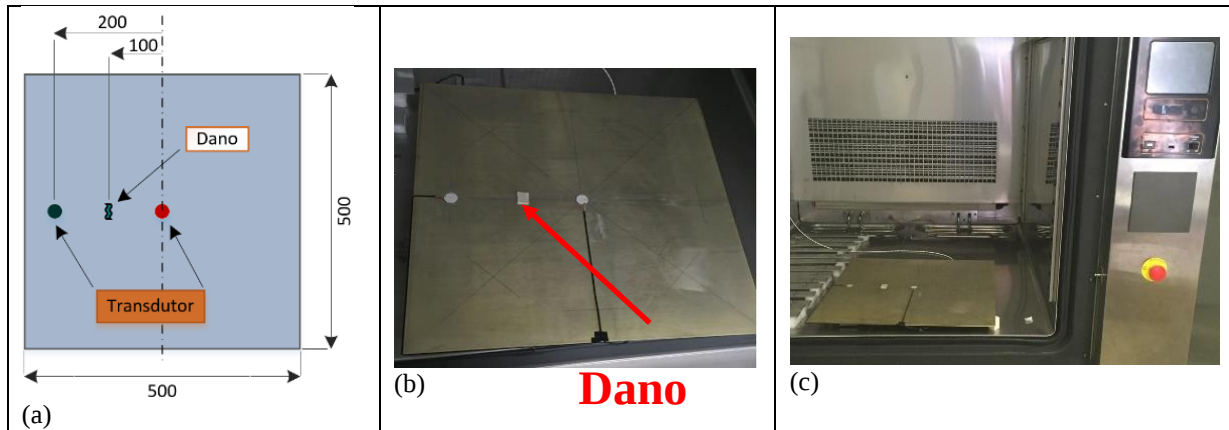


Figura 2: Configuração experimental: (a) Localização dos transdutores, danos e dimensões; (b) o painel instrumentado com adição do dano; (c) corpo de prova colocada no interior da câmara climática.

4. RESULTADOS E INDICES DE DANO

Os resultados de monitoramento usando o sistema de LW são mostrados na Fig. 3, onde se pode ver as 3 *baselines* para as temperaturas de 22°C, 25°C e 28°C. É também possível ver o efeito da temperatura na Fig. 3. Nota que cada um dos três sinais (mostrado na Fig. 3) são as médias dos sinais de cada baseline.

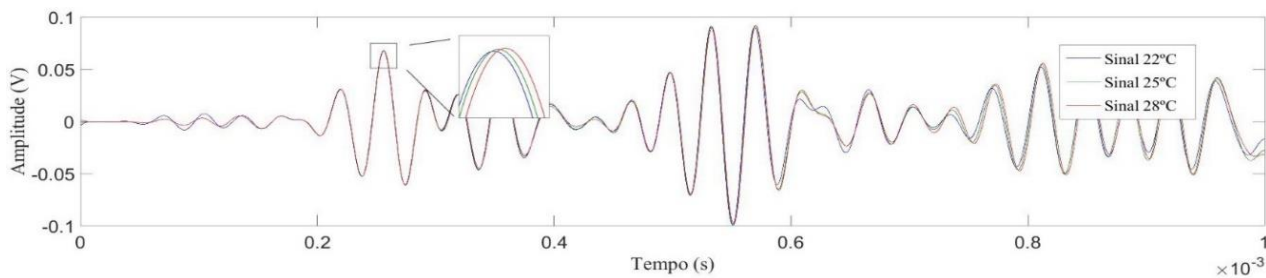


Figura 3: Sinal da baseline para as temperaturas de 22°C, 25°C e 28°C

Na Fig. 4 pode-se observar os índices de dano nas respectivas temperaturas, onde a situação BL se refere à estrutura saudável e as marcações 01, 02, 03 e 04 são as progressões do dano na estrutura segundo a Eq. 01.

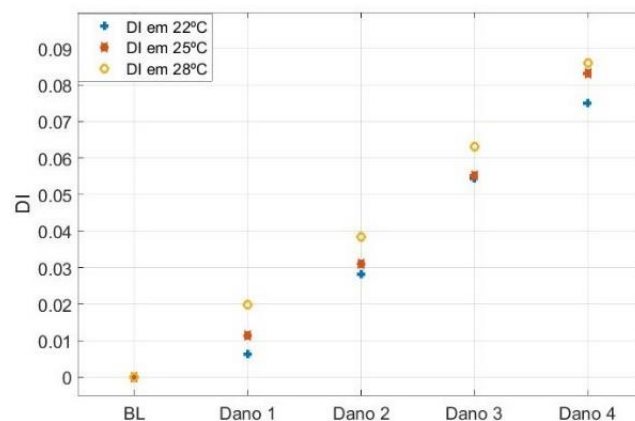


Figura 4: Índice de Dano em 22°C, 25°C e 28°C

Estes resultados mostram que é possível determinar, através de avaliações estatísticas, o valor do limiar que permite o sistema de LW indicar corretamente a presença de danos, mesmo com variações de temperatura, quando se tem a baseline na temperatura alvo.

A secção seguinte descreve o procedimento usado na análise estatística para determinar o valor de limiar, de modo que o sistema de detecção de danos seja capaz de distinguir um estado saudável a partir de um estado com dano.

5. ANÁLISE ESTATÍSTICA E TAXA DE ACERTO

Em SHM é altamente desejável que um nível de limiar (*threshold*) de confiança possa ser estabelecido com base na informação adquirida a partir da estrutura saudável. Após a aquisição dos dados, o próximo passo é a preparação dos sinais brutos para posterior análise. Neste sentido, primeira operação tem a ver com a edição dos dados. Isto se refere às operações de pré-análise que são feitas para detectar e eliminar os sinais de dados espúrios ou degradados que podem resultar de aquisições e processos de gravação dos sinais, como o ruído excessivo, quedas de sinal, ou mesmo de alguma causa externa, como uma falha de alimentação (Bendat et al., 2000).

Um dos métodos aqui aplicado foi o critério de Chauvenet que tem o objetivo de remover os valores da amostra que tem uma maior dispersão em relação à média e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. Assim sendo, o critério do Chauvenet afirma que o desvio de cada uma das medições é comparado com o desvio padrão e, se for inferior à metade da média, então a medição suspeita deve ser rejeitada (Taylor, 1997).

Entre os testes de normalidade existente na literatura estatística, dois foram os escolhidos para verificar a normalidade das amostras. Sendo sucinto, neste trabalho os resultados são apresentados para o DI calculado para todas as situações propostas. O teste de *Jarque-Bera* (JB) e o teste de *Lilliefors* (LF) foram escolhidos uma vez que estes testes parecem ser estatisticamente mais rigorosos e adequados para avaliação das amostras de DI. A desvantagem do teste *Komolgorov-Smirnov* para este processo é que este teste se baseia na informação da população que gerou a amostra de ensaio, ao passo que no LF são testados os parâmetros estatísticos de base a partir da amostra considerada, ao invés de se considerar a população e que, no caso em tela, é inicialmente desconhecida. O teste JB usa os momentos estatísticos de *Skewness* e *Kurtosis*, para verificar se uma amostra vem de uma função de densidade de probabilidade de Gauss (PDF).

5.1. Determinação do valor de *Threshold* com o Controle Estatístico de Processos e intervalos de confiança

Um procedimento mais significativo para estimar os parâmetros de variáveis aleatórias envolve a estimativa de um intervalo, em oposição ao valor de um ponto único, que inclua o parâmetro a ser avaliado com um grau conhecido de incerteza. Para o caso do cálculo do valor médio, um intervalo de confiança pode ser estabelecido para o valor médio μ_x com base na média da amostra $\bar{x}$, de acordo com a Eq. 2:

$$\left[\bar{x} - \frac{\sigma_x Z_{\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x Z_{\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \right], \nu = N - 1 \quad (2)$$

onde μ_x e σ_x são a média da população e o desvio padrão, respectivamente, $\bar{x}$ é a média das amostras, N é o tamanho da amostra, ν é o número de DOF, e $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ é a variável padronizada dada pela Eq. 3, associado com a significância do nível de α :

$$Z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (3)$$

Como σ_x é desconhecido, pode-se determinar o intervalo de confiança para a média desconhecidos μ_x e variância σ_x^2 . Para uma amostra de tamanho N , considera-se as Eq. 4 e Eq. 5 (Charles et al., 2013) para dar os intervalos de confiança para as médias e variâncias, respectivamente:

$$\left[\bar{x} - \frac{st_{\nu; \frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{st_{\nu; \frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \right], \nu = N - 1 \quad (4)$$

$$\left[\frac{\nu S^2}{\chi^2_{\nu; \frac{\alpha}{2}}} \leq \sigma_x^2 < \frac{\nu S^2}{\chi^2_{\nu; 1 - \frac{\alpha}{2}}} \right], \nu = N - 1 \quad (5)$$

onde s^2 é a variância da amostra, $t_{\nu; \frac{\alpha}{2}}$ é uma variável t de *Student* com DOF e $\chi^2_{\nu; \frac{\alpha}{2}}$ é uma variável Qui-Quardado considerados ν DOF.

Portanto, estes intervalos foram obtidos e o limiar foi determinado de acordo com a Eq. 6:

$$DI_{\text{threshold}} = \mu_{x_{\max}} + 5 \sigma_{x_{\max}} \quad (6)$$

onde $\mu_{x_{\max}}$ é o limite superior para a média da população e $\sigma_{x_{\max}}$ é o limite superior para o desvio padrão da população, ambos obtidos a escolha de um nível de significância de $\alpha = 1\%$ aplicado as Eqs. 4 e 5. Deve-se notar que a escolha do valor de *threshold* influencia na probabilidade de detectar um falso positivo. Além disso, o intervalo de confiança obtido com a Eq. 4 é geralmente mais largo do que o obtido com a Eq. 2, embora essa diferença diminua à

medida que o tamanho da amostra aumenta. No entanto, a Eq. 2 fornece um intervalo de confiança da média, com o pressuposto de que a variância da amostra é igual à variação da população. Neste trabalho, a Eq. 2 foi utilizada para estimar o intervalo de confiança significativo, uma vez que a normalidade foi previamente verificada.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma comparação de todos os valores do índice de danos com os valores de *threshold* de cada temperatura resultou em um veredicto sobre a avaliação da sensibilidade do sistema. Esta comparação foi feita também para o caso em que todas as amostras estavam intactas, a fim de realizar uma análise da taxa de falsos positivos.

Como já foi dito, o objetivo desse trabalho é mostrar a influência da temperatura ao se determinar o nível de dano em uma estrutura. Assim, na Fig. 5 o cálculo do DI foi utilizado para a baseline referente à temperatura de 22°C para o cálculo da DI (Eq. 1) dos três casos de temperatura e o Threshold foi calculado segundo a Eq. 6. Já na Fig. 6 é possível verificar a situação inversa, ou seja, o cálculo da DI (Eq. 1) utilizando o baseline referente à temperatura de 28 °C.

As Figs. 5 e 6 mostram os resultados do acerto quando não é possível determinar exatamente a temperatura para o cálculo do DI. É importante ressaltar que não é o objetivo desse trabalho fazer a correção do efeito da temperatura, mas sim mostrar que a variação de temperatura pode gerar uma decisão equivocada quanto à saúde da estrutura.

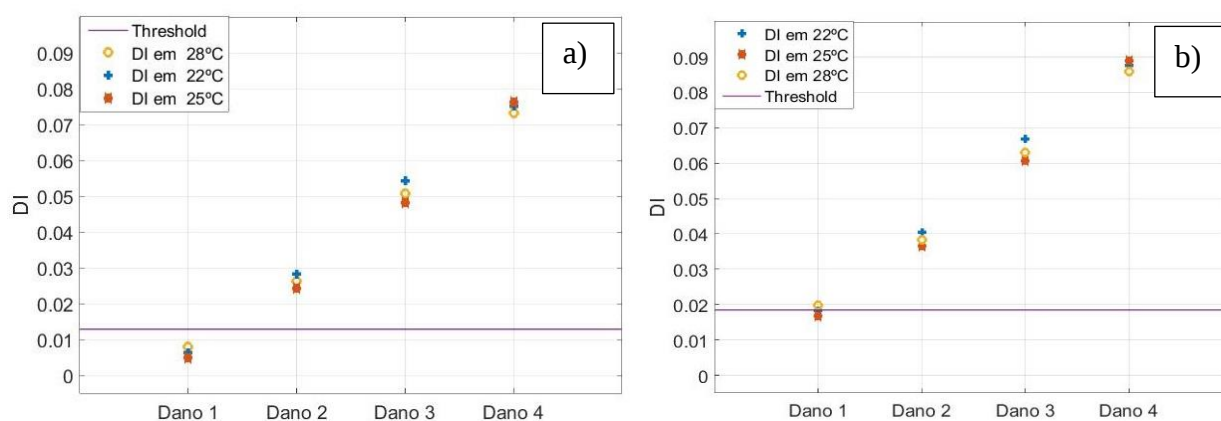


Figura 5: (a) DI utilizando baseline de 22°C, (b) referente à temperatura de 28°C

7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método estatístico que foi desenhado para determinar um nível limite para os dados das LW e realizar uma análise de sensibilidade desta técnica. Este método leva em conta os conceitos de controle estatístico de processos e de intervalo de confiança, a partir da teoria estatística. O valor do *threshold* de decisão obtido com o método proposto foi usado para realizar uma análise de sensibilidade através da taxa de acerto (valores acima do *threshold* nas Figs. 5 (a) e (b)) e como o sistema de detecção pode determinar com sucesso os danos introduzidos. Os testes foram verificados usando dados experimentais obtidos de painéis de alumínio usados em aeronaves em condição de variação de temperatura.

Além disso, um método para realizar a limpeza de dados com o critério do Chauvenet foi também apresentado, visando eliminar falsos positivos e melhorar os resultados globais da POD. A análise estatística incluiu testes de normalidade, assim como a verificação das amostras de todos os DI segundo a distribuição de Gauss.

Os resultados mostraram que o método de LW pode proporcionar uma medida do nível de danos, uma vez que se verificou um aumento da tendência proporcional nas métricas de dano com o aumento no nível de dano (Fig. 04). Nota-se também que a variação de temperatura influencia o DI tanto em amplitude como em fase, sugerindo a necessidade de um algoritmo de compensação de temperatura.

É importante mencionar que as adições de massa feitas no corpo de prova provocam modificações estruturais. Já as trincas de fadiga ou perdas de rebites são danos localizados e progressivos devido a tensões dinâmicas aplicadas continuamente. Desta forma, a alteração estrutural devido a uma falha real é muito expressiva.

Os danos foram introduzidos em uma região localizada entre os dois transdutores piezoelétricos de interesse, o que configura uma situação ‘ideal’ visto que o interesse maior deste trabalho é mostrar a influência da temperatura ao se determinar o *threshold* para uma pequena faixa de temperatura e se chegar a uma segurança de 5% quanto a falsos negativos.

8. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor é grato à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado. Os autores também são gratos ao CNPq e FAPEMIG, agências de pesquisa brasileiras, através do INCT-EIE, que garantiram o financiamento deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS

- Abbate, A., Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S.C.n and Das, P., 1997, Signal detection and noise supression using a wavelet transform signal processor: Application to ultrasonic flaw detection, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 44, pp14-26.
- Bendat, JS, Piersol, AG 2000 Random Data – Analysis and Measurement Procedures. *John Wiley, New York*, 4th edition. ISBN: 978-0470248775.
- Charles Annis, P.E. 2013 Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models. *R package mh1823*, version 3.1.4, available in: Accessed in: August 5th 2013.
- Debnath, L., 2001 Wavelet Transforms & Their Applications, Boston, MA, USA, *Birkhäuser Press*.
- Farrar, C.R.; Lieven, N.A.J.; Bement, M.T., 2005 An Introduction to Damage Prognosis. *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System, Wiley*, Cap.1, p. 1-12. 2005.
- Ginzel E, 2006 *Introduction to the Statistics of NDT. NDT.net – The e-journal of Nondestructive Testing*. ISSN: 1455-4934. May 2006, Vol. 11, No. 5. <http://www.ndt.net/article/v11n05/ginzel2/ginzel2.htm>. Accessed 9 July 2016.
- Harley, J. and Moura, J., 2012 Scale transform signal processing for optimal ultrasonic temperature compensation, *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 10, pp. 2226–2236.
- Huynh, D., He, J., Tran, D., 2005 Damage Location Vector: A non-destructive Structural Damage Detection Technique, *Computers and Structures*, N. 83.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergamn, T. L., 2006 Fundamentals of Heat and Mass Transfer. *Wiley* edition 6, p. 272-275.
- Inman, Dj, Farrar, Cr, Lopes Jr, V, Steffen Jr, V 2005 Damage Prognosis For Aerospace, Civil and Mechanical Systems. *John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK*.
- Kijanka, P., Radecki, R., Packo, P., W. Staszewski, J., and Uhl, T., 2013 GPU-based local interaction simulation approach for simplified temperature effect modelling in Lamb wave propagation used for damage detection, *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no. 3, p. 035014.
- Lemistre, M., Gouyon, R., Kaczmarek, H.; Balageas, D., 1999 Damage Localization in Composite Plates Using Wavelet Transform Processing on Lamb Wave Signals, *Second International Workshop on Structural Health Monitoring*, 1999, Stanford, USA.
- Lind, R., Kyle, S. and Brenner, M., 2001, Wavelet analysis to characterize non-linearities and predict limit cycles of an aeroelastic system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15, 337-356.
- Lu Y., Ye, L., Wang D, Z Zhong and Herszberg I, 2009 Damage Detection in a Large Composite Panel of Five Stiffeners Using Lamb Wave Signals, *Materials forum volume 33*.
- MIL-HDBK-1823A: 2009 Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment Department of Defense Handbook: nondestructive Evaluation System Reliability Assessment.
- Monnier, T, 2006 Lamb Waves-based Impact Damage Monitoring of a Stiffened Aircraft Panel using Piezoelectric Transducers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
- Park, C. Y, 2007 Damage Index Comparison for a Composite Stiffened Panel Using Lamb Wave, *Advanced Materials Research* Vols. 26-28.
- Park, G; Inman, D. J.; 2001 Smart Bolts: An Example of Self-Healing Structures, *Smart Materials Bouletin*, July 2001.
- 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.
- Ramadas, C, Balasubramaniam, K, Joshi, M and Krishnamurthy, CV, 2011 Interaction of Lamb mode (A0) with Structural Discontinuity and Generation of “Turning modes” in a T-joint, Elsevier.
- Rocha, LAA, Rabelo, DS, Steffen Jr., V 2014 Identification of Damage in Structures with Rivets using Impedance techniques and controls of Lamb waves *CONEM 2014* no. 0503.
- Sohn, H., 2005 Statistical Pattern Recognition Paradigm Applied to Defect Detection in Composite Plates in Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems, *John Wiley & Sons Inc. Hoboken, NJ, USA*.
- Sorohan, S., Constantin, N., Ga˘van, M. and Anghel, V., 2011 Extraction of Dispersion Curves for Waves Propagating in Free Complex Waveguides by Standard Finite Element Codes, *Ultrasonics* 51.
- Su, Z., Ye, L., Lu, Y., 2006 Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: a review. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, p. 753-780.
- Su, Z., Ye, L., 2009 Identification of Damage Using Lamb Waves From Fundamentals to Applications, Springer, e-ISBN:978-1-84882-784-4.
- Taylor, JR 1997 An Introduction to Error Analysis. *University Science Books*, 2nd edition. ISBN: 78-0935702750.
- Tseng, K. K-H.; Naidu, A. S. K., 2002 Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. *Journal Smart Material and Structures*. V.11, p. 317-329, maio.
- Wang, C.S. and Chang, F.K., 2000 Diagnosis of impact damage in composite structures with built-in piezoelectrics network, *Proceedings of SPIE*, 3990, 13-19.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.