



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

Roberto Mendes Finzi Neto

Valder Steffen Jr

lucasaarocha@ufu.br

finzi@ufu.br

vsteffen@ufu.br

LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, INCT (EIE) – Instituto da Nacional de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, 38408-196, Brasil.

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 Chaves: Monitoramento da integridade estrutura, ondas de Lamb, determinação de threshold, análise estatística.

Agradecimento: FAPEMIG, CAPES e CNPq

INTRODUÇÃO

A nossa sociedade tem fortemente demandado por soluções na área aeroespacial, de construção civil e estruturas mecânicas, criando uma crescente necessidade de detectar danos estruturais em sua fase mais precoce possível. A estratégia de monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) e avaliação não destrutivas (*Nondestructive Evaluation* – NDE) são foco importante de vários trabalhos de investigação científica ao longo dos últimos vinte anos. As futuras tecnologias de SHM tendem a ser independentes, operando em tempo real. Os principais objetivos destas novas tecnologias têm a ver com segurança estrutural e redução de custos de manutenção, através da substituição da manutenção preditiva tradicional pela manutenção baseada na demanda (ou seja, no comportamento da estrutura conforme informado pela técnica de monitoramento). Na indústria aeroespacial, especialmente, ao se considerar envelhecimento da frota de aeronaves, atualizações, tais como maior capacidade de carga e instalação de novos equipamentos, tudo isso motiva o desenvolvimento de sistemas de SHM. Deve-se ainda salientar a tendência do aumento da utilização de materiais compostos em vários dos componentes de aeronaves, justificando a instalação de sistemas de monitoramento voltados para a detecção de delaminações e descolamentos. Além disso, aparecem vantagens econômicas adicionais ao se poder escolher o local e o momento mais adequados para realizar a manutenção (sistemas tolerantes ao dano, prognóstico de falha). Uma variedade de tipos de danos merece destaque ao se considerar o estado da arte atual, tais como corrosão, trincas e perda de rebites em componentes metálicos e, conforme comentado acima, delaminação e descolamento para o caso de componentes construídos em materiais compostos. Para aeronaves comerciais, trincas de fadiga que se formam em torno de rebites ao longo da fuselagem são exemplos de locais onde o esforço de monitoramento deve ser concentrado. Uma vez estabelecida uma metodologia de SHM, o processo completo geralmente inclui as seguintes etapas: avaliação operacional para aquisição de dados, seleção de atributos e, finalmente, análise estatística para tomada de decisão (Farrar et al., 2005).

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., 2005, Paget et al., 2003, Kessler et al., 2003, Wang e Chang, 2000). 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; Soroohan 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 piezelétricos) 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.

1 ONDAS DE LAMB BASEADOS PARA SHM

Nesta secção, o princípio em que a técnica das ondas de Lamb (*Lamb Wave* – LW) 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.

1.1 Princípio físico da técnica de LW

A técnica de LW é considerada como um método não destrutivo (Monnier, 2006). As ondas de Lamb geralmente ocorrem nos materiais que servem como guias de onda, tais como vigas, placas e cascas. A propagação das LW envolve certa complexidade devido a duas características: dispersão e multimodo (Viktorov, 1967). A técnica permite detectar, principalmente, defeitos presentes em estruturas esbeltas que consigam sofrer perturbações provenientes do atuador piezelétrico incorporado (Farrar et al., 2003).

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.

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).

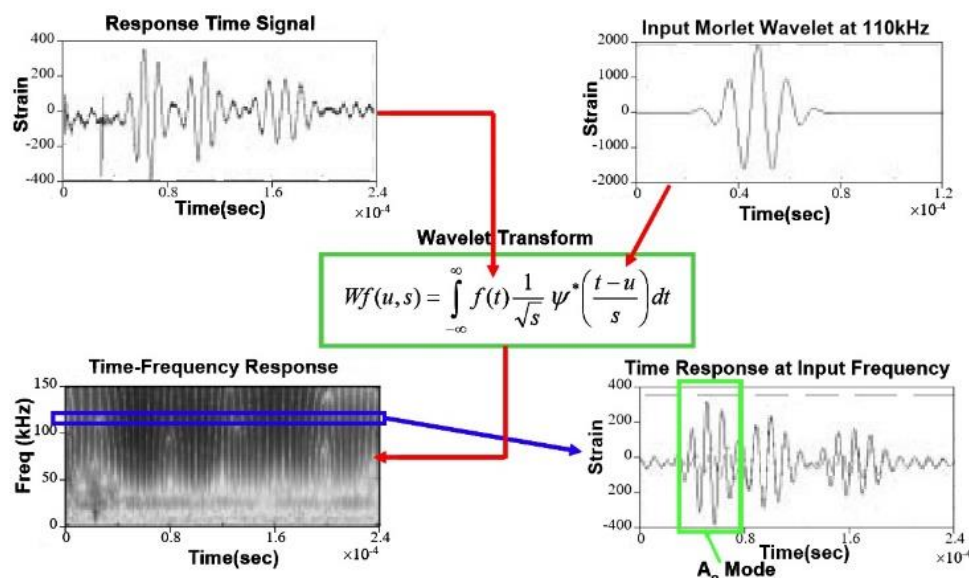


Figura 1: Procedimento para extração de características de dano através da análise por TWC.

1.2 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; Abbateet al., 1997; Lind et al., 2001; Farrar et al., 2005). A formulação para esta métrica é dada pela Eq. (1).

$$DI = 1 - \frac{\int_{x_1}^{x_2} Wft(x, S_0) dx}{\int_{x_1}^{x_2} Wfb(x, S_0) dx} \quad (1)$$

onde $Wft()$ é a 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; x_1 e x_2 são os 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.

A técnica de LW utiliza frequências mais baixas em comparação com aquelas normalmente usadas na técnica da impedância. Isso faz com que o hardware necessário (placa de aquisição de dados, memória de computador, etc.) seja menos sofisticado. A frequência de excitação é afetada pela atenuação ao longo do percurso de propagação e é normalmente determinada experimentalmente.

1.3 Influence da temperature 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. Com base nestes efeitos, pode ser assumido que um efeito da temperatura sobre um sinal LW pode ser aproximado por um *time-stretch* do sinal $x(t)$.

$$x(t) \xrightarrow{Temp} x(\alpha t) \quad (2)$$

onde α é a constante de *time-stretch* (Harley et al., 2012). Esta mudança pode ser observada como uma mudança de fase instantânea do sinal. A transformada de Hilbert pode ser usada como uma ferramenta para extrair essa característica (Kijanka et al., 2013). Utilizando esta abordagem, tem-se um sinal complexo:

$$z(t) = A(t)e^{i\phi(t)} \quad (3)$$

onde $\phi(t)$ representa a fase do sinal.

Se o sinal é afetado apenas pela temperatura, é esperado que uma única fase do sinal mude. Portanto, a influência da temperatura pode ser eliminada se as fases do sinal lido e a baseline forem conhecidos. A fase do sinal modificado pode ser determinada simplesmente usando a seguinte relação:

$$z'_{(t)} = z_{(t)} e^{i(\phi_B(t) - \phi(t))} \quad (4)$$

onde $\phi_B(t)$ é a fase sinal lido da baseline.

O sinal lido pode ser convertido de sua forma analítica de volta para o domínio do tempo, produzindo o sinal com influência da temperatura compensada.

A compensação, no entanto, é apenas para as diferenças de propagação de ondas e não leva em conta os efeitos relacionados com as flutuações no desempenho de transdutores.

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.

2 PROJETO EXPERIMENTAL E CONFIGURAÇÃO

O objetivo de uma NDE é quantificar o tamanho do menor dano que o sistema pode detectar e o maior dano admissível que o sistema pode suportar. A probabilidade de falsos positivos para o experimento foi determinada dentro da gama de temperatura considerada nos testes. A obtenção da taxa de falsos positivos é um passo importante, pois se esta análise for acompanhada por uma taxa alta de falsos positivos, isto poderia aumentar muito os custos de manutenção para a estrutura, inviabilizando o processo.

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 15x0,5 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 Figura 2 (a). A fim de introduzir os danos foi seguido a norma MIL-HDBK 1823A que utiliza a adição de massa (Figura 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). Para geração de sinal foi utilizado um gerador de função da *National Instruments* (PXI-5412 de 14 Bits de resolução e taxa de amostragem de 100 MS/s com amplitude máxima de $\pm 12V_{pk-pk}$). Já para aquisição do sinal foi utilizado digitalizador, também da *National Instruments* (PXI-5105, com 12 bits de resolução e taxa de amostragem de 60 MS/s, com 8 canais independentes). Esta descrição se refere às configurações máximas do equipamento. Esses equipamentos (PXI-5412 e PXI-5105) estão embarcados no chassi PXI-1033 que é uma controladora robusta com capacidade de operar ambos os equipamentos em tempo real. Na Figura 2 (d) mostra-se o equipamento utilizado.

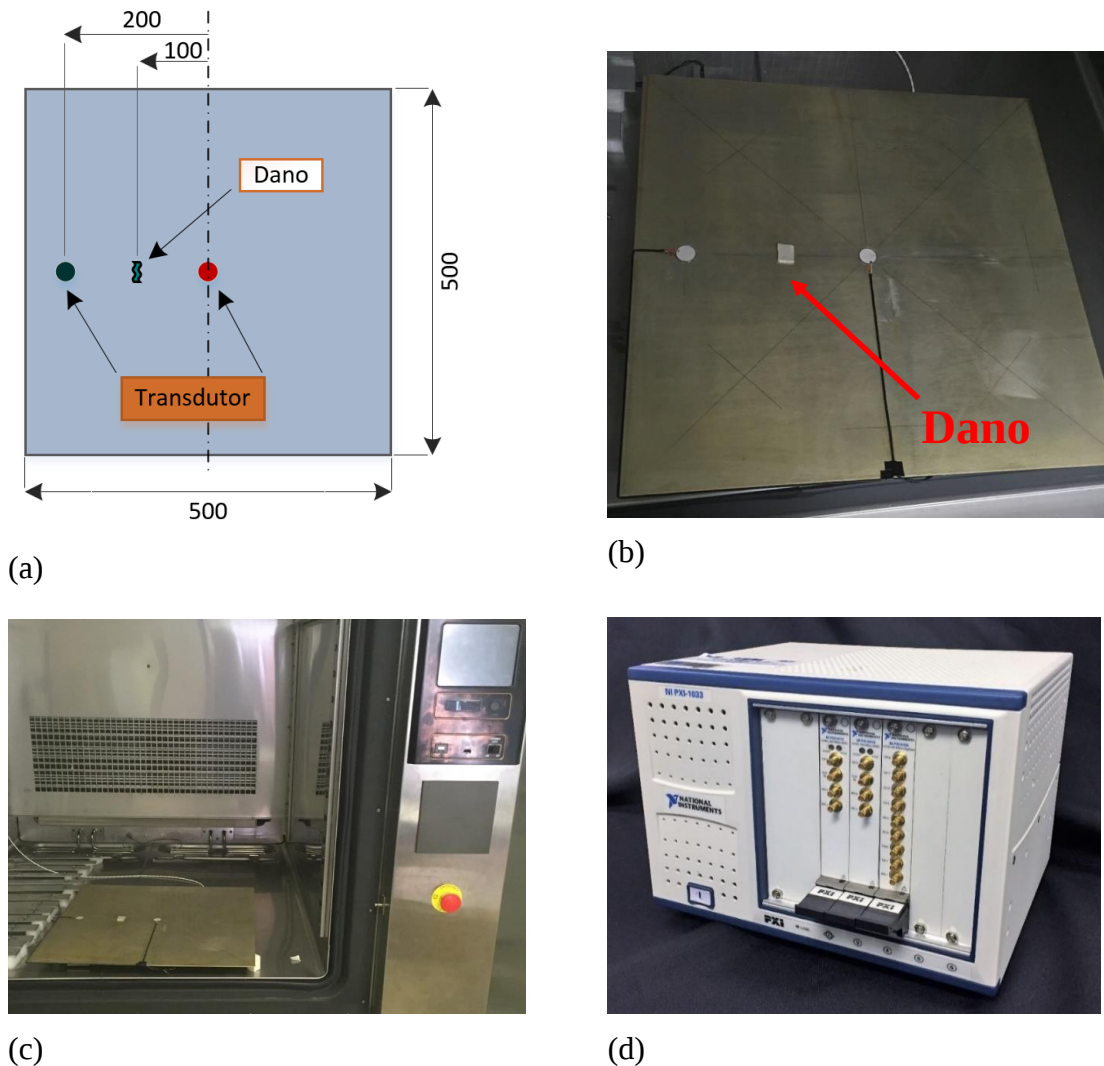


Figura 2: Configuração experimental: (a) Localização dos transdutores, danos e dimensões; (b) o painel instrumentado com adição do dano; (c) corpo de prova colocada no interior da câmara climática nas condições de contorno multe apoiado; (d) equipamento de geração e aquisição de sinal.

Para o controle de temperatura foi utilizada a câmara climática EPL-4H da série Platinous, Figura 2 (c), que emprega um sistema BTHC (*Balanced Temperature and Humidity Control*) que opera com temperaturas que vão de -40°C a 180°C com uma resolução de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

No interior da câmara climática a temperatura variou conforme $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$. O tempo para estabilizar a temperatura no interior da câmara climática foi definida em 45 minutos, (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 (2006).

Foram adquiridos 500 sinais para cada situação com intervalo entre leituras de 100ms.

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.

Para simular o dano na estrutura, optou-se pela adição de massa. Para tanto, foi utilizado *stick-pad* de dimensões de 10x5x2 mm para o primeiro dano (Dano 1), 10x10x2 mm para o segundo (Dano 2), 10x15x2 mm para o terceiro (Dano 3) e 10x20x2 mm para o quarto dano (Dano 4). Esse dano (adição de massa) foi selecionado pela facilidade de simular danos na estrutura, porém sem danificar a mesma.

3 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 são as médias dos sinais de cada baseline.

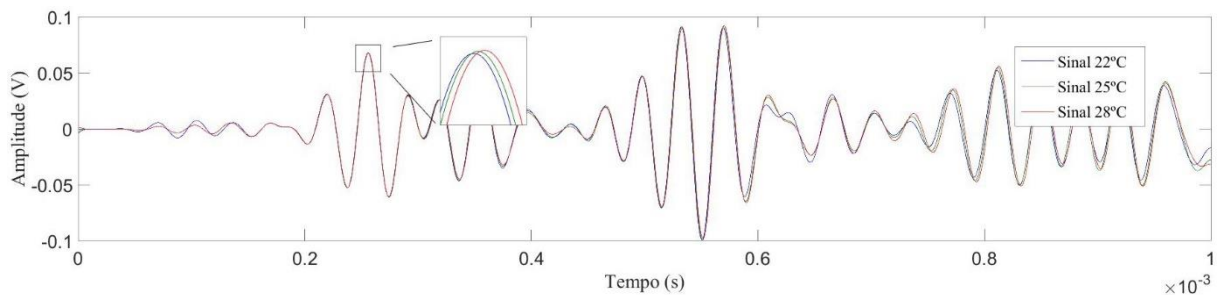


Figura 3: Sinal da *baseline* para as temperaturas de 22°C, 25°C e 28°C

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.

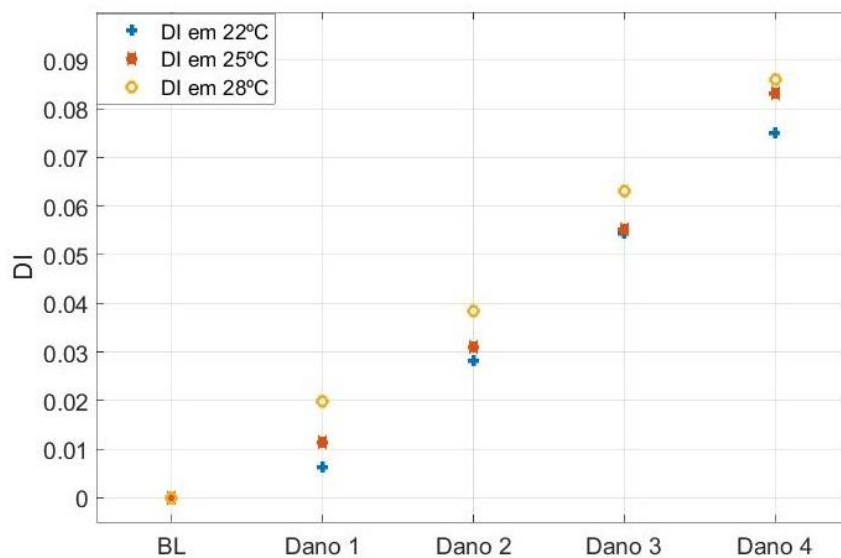


Figura 4: Índice de Dano em 22°C, 25°C e 28°C

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 seção 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.

4 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).

4.1 Detecção de *Outlier* e Limpeza de Dados Através de teste de Chauvenet

Por vezes, a aquisição de uma série de medições aparece em desacordo se comparadas com todas as outras medições realizadas. Quando isso acontece, o operador deve decidir se a medida anômala resultou de algum erro e deve ser rejeitada ou foi uma medida genuína que deveria ser mantida com todas as demais. Ao fazer procedimento de limpeza dos dados, alguns parâmetros estatísticos importantes devem ser usados e, assim, o valor do limiar de dano não será afetado por possíveis valores atípicos que são descartados. Se a anomalia aparece mais de uma vez, o procedimento permite rastrear a causa da anomalia, quer como um erro ou como um efeito físico real. Todas as amostras analisadas neste estudo foram repetidas 500 vezes para cada situação. A utilização do critério do Chauvenet é mostrada na secção seguinte, como forma de melhorar a taxa de sucesso (ou probabilidade de detecção) do sistema LW ao se avaliar o DI de cada situação. O critério do Chauvenet foi selecionado neste estudo devido a sua simplicidade e bom desempenho.

4.2 Teste de Chauvenet

O objetivo do critério de Chauvenet é 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).

Este critério presume que os erros estão normalmente distribuídos e têm variância constante e especifica que qualquer leitura a partir de uma amostra de N leituras deve ser rejeitada se a magnitude do desvio d_{max} do valor médio da amostra é tal que a probabilidade de ocorrência de tal desvio exceda $\left(\frac{1}{2N}\right)$. A Eq. 5 dá o desvio máximo conforme:

$$\frac{d_{max}}{s} = 2.8751e^{0.0003N} - 1.0038e^{-0.0212N} - 1.2712e^{-0.2674N} \quad (5)$$

onde s é o desvio padrão da série e N é o número de pontos de dados. A literatura recomenda que o teste de Chauvenet não deve ser aplicada uma segunda vez. Portanto, esta recomendação

foi rigorosamente seguida neste estudo (Reddy et al., 2011). Além disso, a suposição de que a amostra segue uma distribuição normal foi verificado através de testes de normalidade

4.3 Teste de normalidade

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). Neste trabalho, os códigos MATLAB da toolbox de estatística foram utilizadas e são brevemente descritos nesta seção.

Ambos os testes JB e LF são *two-sided* de *goodness-of-fit* adequados quando uma distribuição nula totalmente especificada é desconhecida e seus parâmetros devem ser estimados. A Eq. 6 define a estatística do teste JB:

$$JB = \frac{N}{6} \left[S_k^2 + \frac{(K_t - 3)^2}{4} \right] \quad (6)$$

onde N é a dimensão da amostra, S_k é a inclinação da amostra (*skewness*), K_t é a amostra de *kurtosis*. A Eq. 7 define a estatística de teste LF:

$$LF = \max_x |SCDF(x) - CDF(x)| \quad (7)$$

onde SCDF é a função de distribuição cumulativa empírica (*cumulative distribution function* - CDF) da amostra e CDF é a normal CDF com média e desvio padrão iguais a parâmetros da amostra.

Para estes dois testes de normalidade, amostras de tamanho inferior a 1.000 e significativos níveis entre 0,001 e 0,50, o teste utiliza uma tabela de valores críticos computados utilizando uma simulação de Monte Carlo. A Tabela 1 resume os resultados do teste de normalidade:

Tabela 1: Resultados do teste de normalidade.

Skewness	Kurtosis	Teste	Ho	p-value[%]	Val. Lim.	Val. Crit.
0.0378	2.8832	JB em 22°C	0	0.5000	0.4032	5.8581
		LF em 22°C	0	0.5000	0.0190	0.0403
0.1075	2.6678	JB em 25°C	0	0.1728	3.2620	5.8580
		LF em 25°C	0	0.1482	0.0350	0.0404
-0.0216	2.6412	JB em 28°C	0	0.2304	2.7207	5.8581
		LF em 28°C	0	0.5000	0.0230	0.0403

Na Tabela 1, os valores de *Skewness* e *Kurtosis* são os momentos estatísticos da amostra analisada. Um teste de normalidade simples é o de verificar que o valor de *Skewness* da amostra é próximo de zero, indicando assim simetria da PDF, bem como *Kurtosis* com valor de três, indicando o formato de pico semelhante à forma de sino clássica de uma distribuição de Gauss. H_0 corresponde à hipótese nula ‘a amostra segue uma distribuição normal’ e o resultado em ambos os casos, sendo que 0 significa que a hipótese nula não deve ser rejeitada. O valor p indica o resultado do teste de hipótese. Se o valor de p é menor do que o nível de significância, α ($\alpha=5$), isso significa que a hipótese nula deve ser rejeitada. As duas últimas colunas correspondem aos valores-limite e os níveis críticos dos testes de normalidade. Para que a hipótese nula seja aceita, o valor crítico deve ser maior do que o valor limite. Estes resultados seguem a notação usada na toolbox de estatística do MATLAB®. Por conseguinte, os resultados indicam que a amostra poderia estar associada a uma distribuição de Gauss, com 95% de confiança.

4.4 Determinação do valor de Threshold com o Controle Estatístico de Processos e intervalos de confiança

Como a normalidade foi confirmada, um conceito do Controle Estatístico de Processos (*Statistical Process Control* - SPC) foi utilizado para determinar o limite superior de controle (*Upper Control Limit* - UCL) e o limite inferior de controle (*Lower Control Limit* - LCL) dos índices de danos (Montgomery, 2003), uma vez que a técnica SPC assume que desvios sucessivos para formar uma função normalmente distribuída. Um gráfico de controle é mostrado na Fig. 5 para os índices de dano nos casos não danificadas, apenas com variação da temperatura.

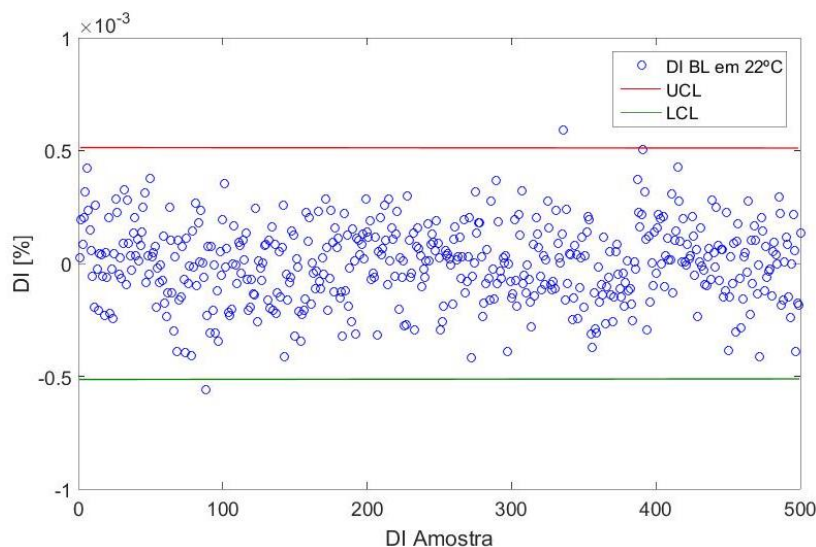


Figura 5: Gráfico de controle para o caso sem danos obtido no DI para 22°C

A Fig. 5 mostra que não foram detectadas anormalidades. A média corresponde nesse caso a 0,02%. As outras duas linhas estão situadas cinco desvios padrão acima e abaixo da média. Entre estes dois limites, de acordo com o PDF normal, 99,73% de todas as observações se ajustam. Uma vez que este não é sempre o caso e interessa obter o valor limite superior, propõe-

se uma metodologia neste trabalho para a determinação do valor do limiar, utilizando o conceito de intervalo 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. 8:

$$\left[\bar{x} - \frac{\sigma_x Z_{\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x Z_{\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \right], \nu = N - 1 \quad (8)$$

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. 9, associado com a significância do nível de α :

$$Z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (9)$$

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. 10 e Eq. 11 (Charles, 2013) para dar os intervalos de confiança para as médias e variâncias, respectivamente:

$$\left[\bar{x} - \frac{st_{\nu, \frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{st_{\nu, \frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \right], \nu = N - 1 \quad (10)$$

$$\left[\frac{\nu S^2}{\chi^2_{\nu, \frac{\alpha}{2}}} \leq \sigma_x^2 < \frac{\nu S^2}{\chi^2_{\nu, 1 - \frac{\alpha}{2}}} \right], \nu = N - 1 \quad (11)$$

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. 12:

$$DI_{\text{threshold}} = \mu_{x_{\max}} + 5 \sigma_{x_{\max}} \quad (12)$$

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. 10 e 11. 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. 10 é geralmente mais largo do que o obtido com a Eq. 8, embora essa diferença diminui à medida que o tamanho da amostra aumenta. No entanto, a Eq. 8 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. 8 foi utilizada para estimar o intervalo de confiança significativo, uma vez que a normalidade foi previamente verificada.

5 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. 6 o cálculo do DI foi utilizado para a *baseline* referente à temperatura de 22°C para o cálculo da DI (Eq. 3) dos três casos de temperatura e o *Threshold* foi calculado segundo a Eq. 12. Já na Fig. 7 é possível verificar a situação inversa, ou seja, o cálculo da DI (Eq. 3) utilizando o *baseline* referente à temperatura de 28 °C.

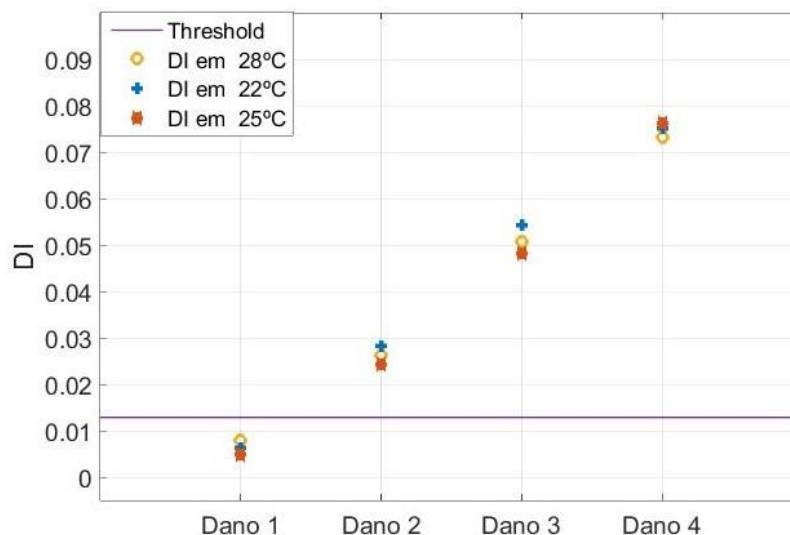


Figura 6: DI utilizando *baseline* de 22°C

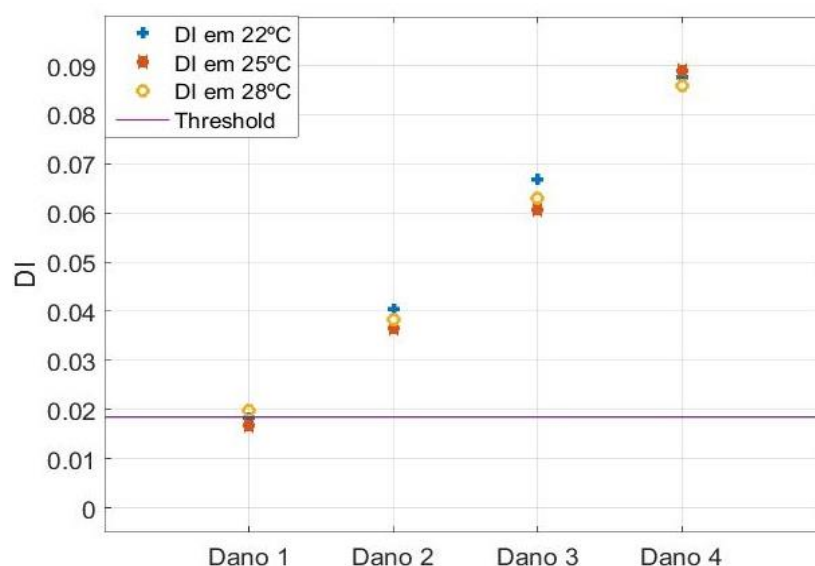


Figura 7: DI utilizando a *baseline* referente à temperatura de 28°C

As Figs. 6 e 7 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.

6 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. 6 e 7) 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.

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.

REFERENCIA

Abbate, A., Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S.C., Das, P., 1997, Signal detection and noise suppression 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, 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.
- Harley, J., 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., 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., 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, Zhong Z., 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*.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C., 2003 *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. ISBN: 8521613601
- 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., Krishnamurthy, C. V., 2011 Interaction of Lamb mode (A0) with Structural Discontinuity and Generation of “Turning modes” in a T-joint, *Elsevier*.
- Reddy, R. A., 2011 Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Scientists. *Springer New York Dordrecht Heidelberg London*, ISBN: 978-1-4419-9612-1.
- Rocha, L. A. A., Rabelo, D. S., 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., Gavan, M., 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., 2004 Lamb Wave-based Quantitative Identification of Delamination in CF/EP Composite Structures Using Artificial Neural Algorithm, *Composite Structures* 66
- Su, Z., Ye, L., 2009 Identification of Damage Using Lamb Waves From Fundamentals to Applications, Springer, e-ISBN:978-1-84882-784-4.
- 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.
- 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.
- Wang, C. S., Chang, F. K., 2000 Diagnosis of impact damage in composite structures with built-in piezoelectrics network, *Proceedings of SPIE*, 3990, 13-19.