

GILBERTO JOÃO PAVANI
(ORGANIZADOR)

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING

Atena
Editora
Ano 2022

GILBERTO JOÃO PAVANI
(ORGANIZADOR)

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING

Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Collection: applied mechanical engineering

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Bruno Oliveira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Gilberto João Pavani

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C697 Collection: applied mechanical engineering / Organizador
Gilberto João Pavani. – Ponta Grossa - PR: Atena,
2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-860-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.608220102>

1. Mechanical engineering. I. Pavani, Gilberto João
(Organizador). II. Título.

CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica aplica os princípios da engenharia, física e ciência dos materiais para a análise, projeto, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos como veículos, máquinas e ferramentas, requerendo a compreensão dos conceitos como automação, ciência dos materiais, cinemática, dinâmica, energia, mecânica dos fluidos, mecanismos, processos de fabricação, termodinâmica e vibrações com o auxílio de ferramentas computacionais para desenho e simulação.

A presente obra “Collection: Applied mechanical engineering” tem como objetivo a apresentação e a discussão de temas relevantes sobre a aplicação da engenharia mecânica na mensuração da criticidade na manutenção de equipamentos, análise de desempenho de indicadores de manutenção, análise de modo e efeito de falha para o desenvolvimento de um plano de manutenção, estudo cinemático das velocidades de um mecanismo genérico, avaliação da eficiência e utilização de ventiladores com motores eletrônicos em sistemas de ar condicionado industrial, desenho de mecanismo e estrutura para animatrônicos, estudo da posição de um mecanismo de quatro barras por meio de uma interface gráfica, modelo matemático para obter a componente axial da velocidade absoluta nos impulsores de turbocompressores centrífugos, mensuração do aumento de eficiência de produção e energia elétrica usando o pré-resfriamento para o ultracongelamento de pães, requisitos metrológicos, ondas de Lamb e métodos estatísticos para detecção do limiar de dano aplicado à estruturas de aeronaves e uso da visão por computador para identificação de circuitos integrados em placas eletrônicas.

Portanto, esta obra apresenta grande potencial para contribuir com o entendimento dos temas apresentados, podendo servir como referência valiosa para novas pesquisas e estudos sobre as questões aqui discutidas.

Agradeço aos autores dos capítulos por suas valiosas contribuições e desejo aos leitores sucesso em seus futuros trabalhos de pesquisa sobre os temas apresentados nesta obra.

Gilberto João Pavani

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

ANÁLISE DE CRÍTICA DE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE CALHAS PLUVIAIS

Pierre Breno Nunes de Assis
Beatriz da Costa Lima
Claudecir Fernandes de Freitas Moura Júnior
Matheus Gomes Lima
Patric de Holanda Nogueira
Ramon Rudá Brito Medeiros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201021>

CAPÍTULO 2..... 16

ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS INDICADORES DE MANUTENÇÃO DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL DO VALE DO JAGUARIBE

José Guilherme Queiroz Sousa
Patric de Holanda Nogueira
James Rodrigo da Silva Lima
Luan Victor Diniz Campos
Ramon Rudá Brito Medeiros
George Luiz Gomes de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201022>

CAPÍTULO 3..... 28

ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA PARA DESENVOLVIMENTO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO PARA UM SISTEMA DE LIMPEZA E PINTURA EM EMPRESA DO SETOR AUTOMOTIVO

Vinícius Gomes Silva
Daniel Levi Maia Matos
João Víctor Nogueira Gonçalves
Gilvan Antônio Cappi
Ramon Rudá Brito Medeiros
George Luiz Gomes de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201023>

CAPÍTULO 4..... 42

APLICAÇÃO DIDÁTICA NO ESTUDO CINEMÁTICO DAS VELOCIDADES DE UM MECANISMO GENÉRICO DE QUATRO BARRAS

Vergara Hernández Erasto
Pérez Millán Brenda Carolina
Cea Montufar César Eduardo
Torres Torres Yael Valdemar

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201024>

CAPÍTULO 5..... 52

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA E UTILIZAÇÃO DOS VENTILADORES COM MOTORES

ELETRÔNICOS (EC) - APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE AR CONDICIONADO INDUSTRIAL

Abimael J. Urcino Junior

Samuel Mariano do Nascimento

Eliandro Barbosa de Aguiar

Alexandre Fernandes Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201025>

CAPÍTULO 6..... 68

DISEÑO DE MECANISMOS Y ESTRUCTURA PARA EL ANIMATRÓNICO DEL DINOSAURIO TRICERATOPS

Roberto Carlos García Gómez

Hernán Valencia Sánchez

Juan Carlos Niños Torres

Mario Alberto Cruz Padilla

Fernando Alfonso May Arrioja

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201026>

CAPÍTULO 7..... 80

ESTUDO DA POSIÇÃO DE UM MECANISMO DE QUATRO BARRAS POR MEIO DE UMA INTERFACE GRÁFICA DE USUARIO

Vergara Hernández Erasto

Pérez Millán Brenda Carolina

Cea Montufar César Eduardo

Yael Valdemar Torres Torres

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201027>

CAPÍTULO 8..... 90

LA ECUACIÓN DE SEGUNDO GRADO COMO MODELO MATEMÁTICO PARA OBTENER LA COMPONENTE AXIAL (C_{2U}) DE LA VELOCIDAD ABSOLUTA EN LOS IMPULSORES DE LOS TURBOCOMPRESORES CENTRÍFUGOS

Tena Verdejo Juan

Santiago Gabino Francisco

Tena Galván Sandra Zulema

Oropeza Ramírez Salvador

Gutierrez Pola Marlenne

Ordoñez Tapia Mayanin

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201028>

CAPÍTULO 9..... 98

MENSURAÇÃO DO AUMENTO DE EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO E ENERGIA ELÉTRICA USANDO O PRÉ RESFRIAMENTO PARA O ULTRACONGELAMENTO DE PÃES

Leandro Fluvio Torno

Alexandre Fernandes Santos

Heraldo José Lopes de Souza

Sariah Torno

Darlo Torno

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201029>

CAPÍTULO 10.....	110
REQUISITOS METROLÓGICOS LEGAIS PARA MEDIÇÃO FISCAL APLICADOS A UNIDADES FLUTUANTES DE PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE PETRÓLEO (FPSO): CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	
Hélio Damásio de Lima Filho	
Jardel Dantas da Cunha	
Andréa Francisca Fernandes Barbosa	
Antônio Robson Gurgel	
Antonio Rodolfo Paulino Fernando Pessoa	
André Luís Novaes Motta	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.60822010210	
CAPÍTULO 11	124
SHM BASEADO EM ONDAS DE LAMB E MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O LIMAR DE DETECÇÃO DE DANO APLICADO A ESTRUTURAS DE AERONAVES	
Lucas Altamirando de Andrade da Rocha	
Roberto Mendes Finzi Neto	
Valder Steffen Jr	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.60822010211	
CAPÍTULO 12.....	138
VISIÓN POR COMPUTADORA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS	
Samuel Sotelo Martínez	
Raúl García García	
Rafael Ocampo Martínez	
Marco Antonio Olivo Flores	
Pablo Saúl Espinoza Aguirre	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.60822010212	
CAPÍTULO 13.....	148
AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM CAVIDADES DIRIGIDAS COM USO DO DESIGN CONSTRUTAL	
Priscila Martta Rodrigues	
Cícero Coelho de Escobar	
Flávia Schwarz Franceschini Zinani	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.60822010213	
SOBRE O ORGANIZADOR.....	159
ÍNDICE REMISSIVO.....	160

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

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 08/10/2021

Lucas Altamirando de Andrade da Rocha

LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, INCT (EIE) – Instituto da Nacional de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia Mecânica
Uberlândia, MG
<http://lattes.cnpq.br/6293082139470909>

Roberto Mendes Finzi Neto

LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, INCT (EIE) – Instituto da Nacional de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia Mecânica
Uberlândia, MG
<http://lattes.cnpq.br/3792275882221002>

Valder Steffen Jr

LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, INCT (EIE) – Instituto da Nacional de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia Mecânica
Uberlândia, MG
<http://lattes.cnpq.br/6838375689601075>

principalmente, na identificação de danos estruturais, mas não tanto sobre modelagem estatística para determinar um valor de referência a ser considerado como 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: Monitoramento da integridade estrutura, ondas de Lamb, determinação de threshold, análise estatística.

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,

SHM BASED ON LAMB WAVES AND STATISTICAL METHODS FOR THE DAMAGE DETECTION THRESHOLD

ABSTRACT: The method based on Lamb waves has become a promising tool for damage identification and is considered as being a non-destructive damage detection technique. Conventional studies have focused mainly on identifying structural damage, but not so much on statistical modeling to determine a threshold for decision making in damage detection systems. In this study, the Lamb wave technique is used to detect damage considering the effects of temperature variation. For this purpose, a 2024-T3 aluminum plate instrumented with piezoelectric transducers in the Pitch-Catch configuration was used, with temperatures varying according to $25\pm 3^{\circ}\text{C}$. Consequently, the present work proposes a statistical methodology to determine the limit (threshold) for damage detection using concepts of Statistical Process Control, within a given confidence level diagnosis. The results showed that the damage threshold levels were able to identify the damage inserted in the plate, which is characterized by the non-destructive evaluation standard with 95% confidence intervals within the considered range of temperatures.

KEYWORDS: Structural health monitoring, Lamb waves, threshold determination, statistical analysis.

1 | INTRODUÇÃO

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. Na indústria aeroespacial, especialmente, ao se considerar o envelhecimento da frota de aeronaves, atualizações (tais como maior capacidade de carga e instalação de novos equipamentos), tudo isso acrescenta motivação para o desenvolvimento de sistemas de SHM. 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 erroneamente 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). 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 capítulo investiga a utilização de pastilhas de PZT (sensores/atuadores piezelétricos) para detectar uma modificação estrutural representada pela adição de massa (modificação estrutural usada como 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. 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 das ondas de Lamb considerando a taxa de sucesso, a fim de detectar danos inseridos em 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 (*Lamb Wave* – LW) se baseia é brevemente discutido juntamente com a metodologia segundo a qual os danos estruturais são detectados. Além disso, são discutidos ainda os problemas relacionados à variação de temperatura.

2.1 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 são suscetíveis a sofrer perturbações provenientes do atuador piezelétrico incorporado (Farrar et al., 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 janela Hann 3,5 (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 para 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 do *pitch-catch*.

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).

2.2 Índice de Dano

É possível determinar um valor quantitativo associado ao dano. Um dos índices mais utilizados é o chamado Índice de Dano (*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.

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 observados 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 $x_{(t)}$.

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

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 empregada 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 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 a 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.

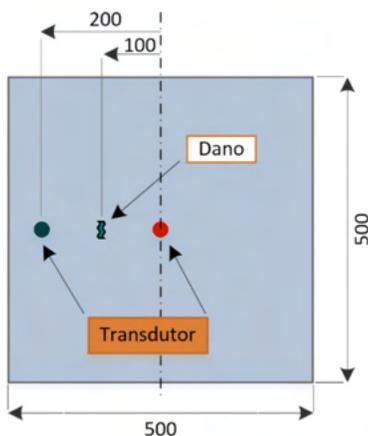
3 | PROJETO EXPERIMENTAL E CONFIGURAÇÃO

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 que influem no 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, dentre outras. A incerteza do processo NDE é representada por uma matriz de teste contendo diferentes inspeções a serem realizadas no conjunto completo de amostras

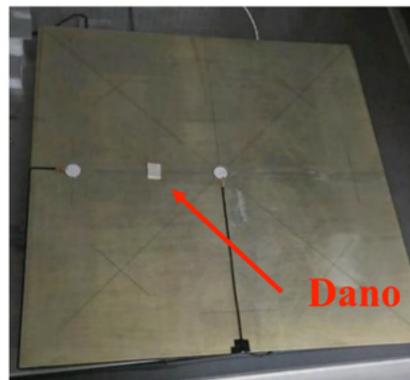
(Ginzel, 2006).

Assim, uma 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 1(a). A fim de introduzir os danos foi seguido a norma MIL-HDBK 1823A que utiliza a adição de massa (Figura 1(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 (por ser algo 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 do 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 $\pm 12 V_{pk-pk}$). Já para aquisição do sinal foi utilizado um digitalizador, também da *National Instruments* (PXI-5105, com 12 bits de resolução e taxa de amostragem de 60 MS/s, com 8 canais independentes). Esses equipamentos (PXI-5412 e PXI-5105) estão embarcados no chassi PXI-1033, uma controladora robusta com capacidade de operar ambos os equipamentos em tempo real. Na Figura 1(d) mostra-se o equipamento utilizado.

Para o controle de temperatura foi utilizada a câmara climática EPL-4H da série Platinous, Figura 1(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 $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1: 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.

No interior da câmara climática a temperatura variou conforme 25 ± 3 °C. O tempo para estabilizar a temperatura no interior da câmara climática foi definido como sendo de 45 minutos, (Incropera et al., 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, conforme a adição de um *stick patch*, respeitando o tempo entre as adições de danos para a temperatura estabilizar.

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 um 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 um *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). Este procedimento (adição de massa) foi selecionado pela facilidade de simular danos na estrutura (provocando uma modificação estrutural), porém sem danificar a mesma.

4 | RESULTADOS E INDICES DE DANO

Os resultados de monitoramento usando o sistema de LW são mostrados na Fig. 2, 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. 2. Nota-se que cada um dos três sinais são as médias dos sinais de cada baseline.

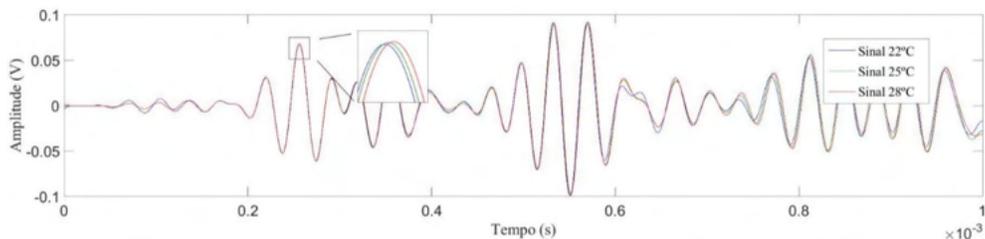


Figura 2: Sinal da *baseline* para as temperaturas de 22°C, 25°C e 28°C

Na Fig. 3 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.

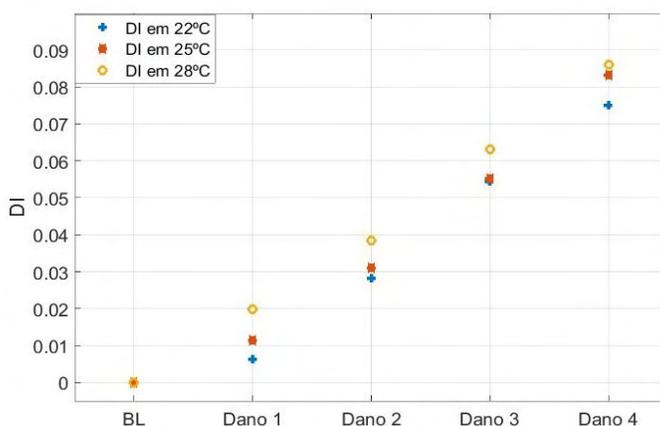


Figura 3: Índice de Dano em 22°C, 25°C e 28°C

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.

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, a 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).

5.1 Teste de Chauvenet

O objetivo do critério de Chauvenet é remover os valores da amostra que têm 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 específica 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 deste desvio exceda $\left(\frac{1}{2N}\right)$. A Eq. 5 fornece 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.

5.2 Teste de normalidade

Entre os testes de normalidade existentes na literatura sobre 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 mostram-se estatisticamente mais rigorosos e adequados para avaliação das amostras de DI. A desvantagem do teste *Komolgorov-Smirnov* para este processo é que este 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 do toolbox de estatística foram utilizadas e são brevemente descritos nesta seção.

Para estes dois testes de normalidade, amostras de tamanho inferior a 1.000 e níveis

significativos 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:

Skewness	Kurtosis	Teste	Ho	p-value[%]	Val. Lim.	Val. Crit.
0,0378	2,8832	JB 22°C	0	0,5000	0,4032	5,8581
		LF 22°C	0	0,5000	0,0190	0,0403
0,1075	2,6678	JB 25°C	0	0,1728	3,2620	5,8580
		LF 25°C	0	0,1482	0,0350	0,0404
-0,0216	2,6412	JB 28°C	0	0,2304	2,7207	5,8581
		LF 28°C	0	0,5000	0,0230	0,0403

Tabela 1: Resultados do teste de normalidade.

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 se o valor de *Skewness* da amostra é próximo de zero, indicando assim simetria da PDF, bem como a *Kurtosis* com valor de três, indicando o formato de pico semelhante à forma de sino clássica de uma distribuição de Gauss. corresponde à hipótese nula, ou seja, '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.

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

Como a normalidade foi confirmada, 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. 5:

$$\left[\bar{x} - \frac{\sigma_x Z_{\alpha}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x Z_{\alpha}}{\sqrt{N}} \right], \nu = N - 1 \quad (5)$$

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

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (6)$$

Como σ_x é desconhecido, pode-se determinar o intervalo de confiança para a média desconhecidos os valores de μ_x e variância σ_x^2 . Para uma amostra de tamanho N , considera-se as Eq. 7 e Eq. 8 (Charles, 2013) para dar os intervalos de confiança para as médias e variâncias, respectivamente:

$$\left[\bar{x} - \frac{st_{v;\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{st_{v;\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \right], v = N - 1 \quad (7)$$

$$\left[\frac{vS^2}{\chi^2_{v;\frac{\alpha}{2}}} \leq \sigma_x^2 < \frac{vS^2}{\chi^2_{v;1-\frac{\alpha}{2}}} \right], v = N - 1 \quad (8)$$

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

Portanto, estes intervalos foram obtidos e o limiar foi determinado de acordo com a Eq. 9:

$$DI_{\text{threshold}} = \mu_{x_{\text{max}}} + 5 \sigma_{x_{\text{max}}} \quad (9)$$

onde $\mu_{x_{\text{max}}}$ é o limite superior para a média da população e $\sigma_{x_{\text{max}}}$ 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. 7 e 8. 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. 7 é geralmente mais largo do que o obtido com a Eq. 5, embora essa diferença diminui à medida que o tamanho da amostra aumenta. No entanto, a Eq. 5 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. 5 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 uma definição sobre a 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. 4(a) 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. 6. Já na Fig. 4(b) é

possível verificar a situação inversa, ou seja, o cálculo da DI (Eq. 3) utilizando o *baseline* referente à temperatura de 28 °C.

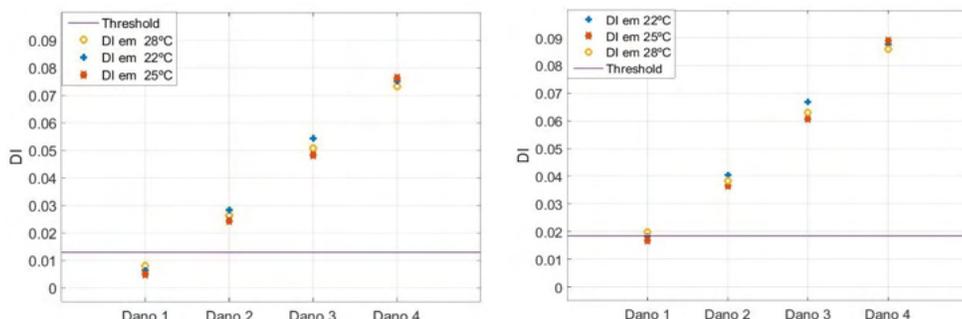


Figura 4: a) DI utilizando baseline de 22°C; b)DI utilizando a baseline referente à temperatura de 28°C

As Figs. 4 (a) e (b) 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 o de simplesmente mostrar que a variação de temperatura pode gerar uma decisão equivocada quanto à saúde da estrutura.

7 | CONCLUSÃO

Este capítulo 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. 4 (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. 02). 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.

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.

REFERÊNCIAS

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.

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*.
- Park, C. Y, 2007 **Damage Index Comparison for a Composite Stiffened Panel Using Lamb Wave**, *Advanced Materials Research Vols. 26-28*.
- 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., 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.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análise dos Modos e Efeitos de Falha - FMEA 29

Análise estatística 124, 125, 131, 135

C

Calha 7, 15

Cinemática 42, 43, 90, 91, 92

Circuito integrado 138, 142, 143, 144, 145, 146, 147

Confiabilidade 14, 25, 28, 40, 41

Criticidade 1, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 32, 36, 66

D

Desenho 151

E

Estrutura 7, 23, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 134, 135, 150

F

Ferramenta da qualidade 22

Floating Production Storage and Offloading - FPSO 111, 112

I

Impulsor 91, 92, 93, 94, 95

Indústria têxtil 16

Interface gráfica 80

M

Manutenção 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 52, 53, 54, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 112

Manutenção corretiva 1, 3, 4, 5, 8, 11, 18, 19, 39

Manutenção preventiva 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 18, 19, 38, 61

Mecanismo 10, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 50, 71, 74, 75, 76, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 152

Mecanismo de quatro barras 80

Medição fiscal 110, 111, 112, 113, 114, 118

Monitoramento da integridade estrutural 125

O

Ondas de Lamb 124, 125, 126, 129

P

Petróleo 43, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 119, 120, 121, 123

Placa eletrônica 61

Plano de manutenção 4, 5, 7, 12, 13, 22, 28, 30, 35, 37, 40, 54, 63, 64

Pré-resfriamento 98

Q

Qualidade 1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 29, 33, 40, 41, 99, 101, 122

R

Rendimento térmico 98

Requisitos metrológicos 110, 111

T

Tempo Médio de Reparo - MTTR 17, 24

Tempo Médio entre Falhas - MTBF 17, 22

Triceratops 68, 69, 77

U

Ultracongelamento 98, 102, 107, 108

V

Ventilador 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 65, 66

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING


Ano 2022