



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



**Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica**

CRISTIANO SOARES JUNIOR

**UM ESTUDO ACERCA DE UM NOVO MÉTODO DE GERAÇÃO DE ONDAS
ACÚSTICAS PARA SHM BASEADO NO LANÇAMENTO DE ESFERA METÁLICA
UTILIZANDO CFRP E DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO**

**Bauru
2023**

CRISTIANO SOARES JUNIOR

**UM ESTUDO ACERCA DE UM NOVO MÉTODO DE GERAÇÃO DE ONDAS
ACÚSTICAS PARA SHM BASEADO NO LANÇAMENTO DE ESFERA METÁLICA
UTILIZANDO CFRP E DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Bauru/ FEB da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” /
UNESP, para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação

Linha de pesquisa: Mecatrônica

Orientador: Prof. Titular Paulo Roberto de Aguiar

**Bauru
2023**

Junior, Cristiano Soares.

Um estudo acerca de um novo método de geração de ondas acústicas para SHM baseado no lançamento de esfera metálica utilizando CFRP e diafragma piezelétrico/ Cristiano Soares Junior, 2023

74 f. il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2023

1. Emissão Acústica. 2. Lançamento de Esfera. 3. Monitoramento. 4. Integridade Estrutural do CFRP I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CRISTIANO SOARES JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 01 dias do mês de junho do ano de 2023, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CRISTIANO SOARES JUNIOR, intitulada **Um estudo acerca de um novo método de geração de ondas acústicas para SHM baseado no lançamento de esfera metálica utilizando CFRP e diafragma piezelétrico**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. EVERALDO SILVA DE FREITAS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário de Lins - UNILINS, Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR

Dedico a minha família que me apoia em tudo que está ao seu alcance para que eu seja feliz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida.

Agradeço ao meu pai, Cristiano, que sempre me apoiou de todas as formas possíveis e pelo vosso exemplo me ensinou como um homem deve ser.

Agradeço a minha mãe, Marisa, que sempre me incentivou a estudar e acreditou em mim, sendo meu alicerce nos momentos difíceis.

Agradeço a minha irmã, Bianca, que sempre me apoiou e comemorou cada uma de minhas conquistas como se fossem dela.

Agradeço a minha avó Valdenice, e meu avô Paulo (*in memoriam*), por todo amor, carinho, dedicação e ensinamentos que foram dados a mim da melhor maneira que encontraram ao longo de toda minha vida até aqui.

Ao Professor Paulo Roberto de Aguiar, gostaria de agradecer profundamente pela oportunidade logo no início do mestrado, de poder acompanhar e me tornar parte da equipe de pesquisa do LADAPS. Agradeço pela paciência quando houve momentos difíceis, por toda orientação e ensino durante todo este tempo. Através de seus exemplos, conselhos e ensinamentos me tornei uma pessoa melhor. O senhor hoje é como parte integrante de minha família e ajudou a construir meu caráter pessoal e profissional, assim como faz um pai. Muito obrigado professor, por ser, além de tudo, um ótimo amigo.

Ao Professor Pedro Oliveira, pela disposição e alegria em ensinar e orientar. Obrigado pela sinceridade e por sempre buscar um meio para contribuir com a pesquisa.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB por todo ensino e atendimento prestado durante esse tempo.

Aos meus amigos de laboratório, que compartilharam comigo todos os momentos vividos dentro do LADAPS, em especial à Felipe Alexandre (*in memoriam*), Martin Aulestia, Pedro Oliveira, Breno Ortega, Wenderson Lopes, Zaqueu Ricardo, Thiago Glisoi, Gabriel David, Paulo Monson, e aos amigos de outros laboratórios de pesquisa da UNESP – Bauru, vocês foram simplesmente fantásticos.

Ao meu amigo, Danilo Marcus, por me inserir na pós graduação, e por me apresentar ao professor Paulo Roberto de Aguiar, que me acolheu no LADAPS desde o primeiro dia. Danilo, Sua ajuda foi fundamental, e eu serei eternamente grato.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e apoiaram essa etapa.

“Não corrigir nossas falhas é o mesmo que cometer novos erros.”

- Confúcio, pensador e filósofo chinês

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a sensibilidade de estruturas de CFRP (*carbon fiber reinforced polymer* – polímero reforçado de fibra de carbono) quando submetida a impulsos mecânicos provenientes do lançamento vertical de uma esfera metálica, bem como a viabilidade deste método para aplicação em NDT (*Non Destructive Test* - Ensaios Não Destrutivos), comumente empregados para sistemas SHM (*Structural Health Monitoring* – Monitoramento de Integridade Estrutural). O CFRP se trata de uma estrutura compósita laminada, geralmente composta de uma matriz polimérica e reforçada com fibras de carbono sobrepostas. Este material é altamente utilizado na indústria atualmente, e apesar da vasta quantidade estudos encontrados na literatura, ainda há várias lacunas que devem ser preenchidas sobre a caracterização deste tipo de compósito. Para tanto, este trabalho utilizou uma estrutura sustentadora onde foi fixado um eletroímã responsável por suspender a esfera metálica posteriormente lançada sobre uma estrutura de CFRP escolhida para realização dos experimentos de modo a extrair características através da análise das ondas mecânicas geradas devido ao impacto da esfera na superfície do CFRP. As ondas foram captadas por um transdutor piezelétrico fixado na extremidade da estrutura. Diferentes alturas de lançamento foram simuladas e comparadas a fim de se obter correlações entre a altura de lançamento e a amplitude dos sinais por meio de técnicas de processamento digital de sinais, tais como a FFT (*Fast Fourier Transform* - Transformada Rápida de Fourier) e o RMS (*Root Mean Square* - Raiz Média Quadrática). A técnica utilizada apresentou altos índices de repetibilidade, e a estrutura de CFRP se demonstrou sensível a variação de altura de lançamento, especialmente na banda de frequência de 0 a 25 kHz.

ABSTRACT

This work presents a study on the sensitivity of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) structures when subjected to mechanical impulses caused by the vertical launch of a metal sphere, as well as the feasibility of this method for application in non-destructive testing (NDT), usually employed for SHM. CFRP is a laminated composite structure, usually composed of a polymer matrix and reinforced with overlapping carbon fibers. This material is largely used in the industry nowadays, and despite the wide literature, there still are many gaps to be filled about the characterization of this kind of composite. For this purpose, this work used a supporting structure where an electromagnet was installed in order to suspend the metallic sphere subsequently launched on the CFRP structure chosen to perform the experiments to extract characteristics through the mechanical wave analysis generated due to the impact of the sphere on the CFRP surface. The waves were acquired by a piezoelectric transducer fixed at the structure edge. Different launch heights were simulated and compared in order to obtain correlations between the launch height and the signal amplitude by means of digital signal processing techniques such as fast Fourier transform (FFT) and root mean square (RMS). The used technique showed high repeatability rates, and the CFRP structure proved to be sensitive to launch height variation, especially in the frequency band from 0 to 25 kHz.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	13
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	16
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações iniciais.....	17
1.2 Objetivos.....	18
Capítulo 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1 Compósito de fibra de carbono	19
2.2 Pencil Lead Break (PLB)	26
2.3 Técnicas de processamento digital de sinais.....	28
2.3.1 RMS	28
2.3.2 Coeficiente de Correlação.....	28
2.3.3 Desvio médio quadrático	29
2.3.4 Desvio do coeficiente de correlação	29
Capítulo 3 - MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 Testes de PLB e testes de lançamento de esfera no material a base de CFRP	30
3.1.1 Configuração experimental para os testes de PLB	30
3.1.2 Procedimentos experimentais	30
3.1.3 Configuração experimental para os testes de lançamento de esfera	31
3.1.4 Procedimentos experimentais para o método de lançamento de esfera.....	32
3.1.5 Avaliação prévia de danos no CFRP	33
3.2 Testes de PLB e testes de lançamento de esfera no material a base de alumínio	34
3.2.1 Configuração experimental para os testes de PLB	34
3.2.2 Procedimentos experimentais	34
3.2.3 Configuração experimental para os testes de lançamento de esfera.....	35
3.2.4 Procedimentos experimentais para o método de lançamento de esfera.....	35
3.2.5 Avaliação prévia de danos na placa de Alumínio.....	35
3.3 Ensaio de monitoramento de integridade estrutural.....	36
3.3.1 Configuração experimental.....	36
Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1 Resultado obtidos com os testes realizados na estrutura de CFRP.....	38

4.1.1	Resultados utilizando o método PLB.....	38
4.1.2	Resultados utilizando o método de lançamento de esfera metálica.....	41
4.1.3	Resultados comparativos entre o método de lançamento de esfera metálica e o método PLB	47
4.2	Resultados obtidos com os testes performados na estrutura de alumínio.....	49
4.2.1	Resultados utilizando o método PLB.....	49
4.2.2	Resultados utilizando o método de lançamento de esfera metálica.....	50
4.2.3	Resultados comparativos entre o método de lançamento de esfera metálica e o método PLB	53
4.3	Resultados dos ensaios de monitoramento de integridade estrutural	53
Capítulo 5 - CONCLUSÃO.....		63
REFERÊNCIAS		65
Apêndice A – MEDIÇÕES COMPLETAS		69
Apêndice B – MÉTRICAS OBTIDAS A PARTIR DA PSD.		72

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estruturas primarias em um A350 XWB onde o CFRP é empregado.	20
Figura 2 - Composição estrutural: (a) Boeing 787 Dreamliner; e (b) AirbusA350 XWB.	21
Figura 3 - Fuselagem do Boeing 787 e Airbus A350 XWB. Fonte: (Giurgiutiu, 2016)	22
Figura 4 - CFRP empregado na estrutura do modelo monocoque McLaren P1. Fonte: (Jin <i>et al.</i> , 2021).....	22
Figura 5 – Delaminação em compósitos de CFRP. Fonte: Adaptado de (Geier <i>et al.</i> , 2019).23	
Figura 6 – Teste PLB efetuado sobre uma placa de alumínio. Fonte: Adaptado de (Lopes <i>et al.</i> , 2019).....	27
Figura 7 – Banco de ensaios	32
Figura 8 – Análise de impacto em CFRP: (a) antes; (b) depois	34
Figura 9 – Análise de impacto em alumínio: (a) esfera de 3,9 mm; (b) esfera de 6,3 mm	36
Figura 10 – Placa de CFRP com adição de massa.....	37
Figura 11 – Espectro de frequência médio dos testes PLB	39
Figura 12 – MCS para testes de PLB feitos na posição 1.	39
Figura 13 - MCS para testes de PLB feitos na posição 2.	40
Figura 14 - MSC do PLB em CFRP de 0 a 260 kHz.....	40
Figura 15 – Espectro de frequência em CFRP	41
Figura 16 – Banda de frequência em CFRP de 12 a 17 kHz	42
Figura 17 – Banda de frequência de 0 a 5 kHz.....	43
Figura 18 – Banda de frequência de 5 a 10 kHz.....	43
Figura 19 – Banda de frequência de 10 a 15 kHz.....	44
Figura 20 – Banda de frequência de 15 a 20 kHz.....	44
Figura 21 – Banda de frequência de 20 a 25 kHz.....	45
Figura 22 – Banda de frequência de 25 a 30 kHz.....	45
Figura 23 – Espectro de frequência de 0 a 50 kHz.....	46
Figura 24 – Sinal RMS	46
Figura 25 – Sinal bruto no domínio do tempo.....	47
Figura 26 – MSC sobrepostos	48
Figura 27 – Espectros de frequência em base logarítmica	48
Figura 28 – Espectro de frequência do PLB no alumínio.....	49
Figura 29 - Espectro de frequência do PLB no alumínio de 2 kHz a 5 kHz	49
Figura 30 – MSC para os ensaios de PLB no alumínio.....	50
Figura 31 - Espectro de frequência do lançamento de esfera em alumínio de 0 a 100 kHz.....	51
Figura 32 - Espectro de frequência do lançamento de esfera em alumínio de 0 a 4 kHz.....	51
Figura 33 – MSC Lançamento de esfera em alumínio	52
Figura 34 – MSC do lançamento de esfera e PLB no alumínio	53
Figura 35 - Espectro de frequência dos testes com simulação de danos em CFRP	54
Figura 36 – Faixa de frequência representativa para ensaios em CFRP	55
Figura 37 - Espectro de frequência dos testes com simulação de danos em Alumínio.....	55
Figura 38 - Faixa de frequência representativa para ensaios em alumínio.....	56
Figura 39 – Índice CCDM aplicado em CFRP.....	57
Figura 40 – Índice CCDM aplicado em CFRP na faixa de frequência de 8 kHz à 16 kHz	57
Figura 41 - Índice CCDM aplicado em alumínio	58
Figura 42 – Índice CCDM em alumínio na faixa de frequência de 8 kHz à 16 kHz	59
Figura 43 – Índice RMSD aplicado em CFRP.....	59
Figura 44 – Índice RMSD aplicado em CFRP na faixa de frequência de 8 kHz à 16 kHz	60
Figura 45 - Índice RMSD aplicado em Alumínio	61
Figura 46 - Índice RMSD aplicado em alumínio na faixa de frequência de 8 kHz à 16 kHz ..	61

Figura 47 – RMSD a partir do PSD para a estrutura de CFRP	72
Figura 48 - CCDM a partir do PSD para a estrutura de CFRP.....	73
Figura 49 - RMSD a partir do PSD para a estrutura de Alumínio	73
Figura 50 - CCDM a partir do PSD para a estrutura de alumínio	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média e desvio padrão dos coeficientes de correlação do PLB.....	30
Tabela 2 – Coeficiente de correlação dos testes de PLB.....	31
Tabela 3 – Média e desvio padrão dos coeficientes de correlação	33
Tabela 4 – Coeficiente de correlação para ensaios de PLB no alumínio	35
Tabela 5 – Coeficiente de correlação dos lançamentos em alumínio.....	52
Tabela 6 – Medições completas.....	69
Tabela 7 – Aferição de massas	71

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)
NDT	Ensaio não destrutivo (<i>Non-Destructive Testing</i>)
SHM	Monitoramento da integridade estrutural (<i>Structural Health Monitoring</i>)
CCDM	Métrica do desvio do coeficiente de correlação (<i>Correlation coefficient deviation metric</i>)
FFT	Transformada rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
RMS	Valor médio quadrático (<i>Root Mean Square</i>)
RMSD	Desvio da raiz média quadrática (<i>Root Mean Square Deviation</i>).
UVAD	Furação assistida por vibração ultrassônica (<i>Ultrasonic Vibration Assisted Drilling</i>)
AE	Emissão Acústica (<i>Acoustic Emission</i>)
CNN	Redes Neurais Convolucionais (<i>Convolutional Neural Networks</i>)
PCA	Análise de componentes principais (<i>Principal Components Analises</i>).
CER	Arredondamento da ponta de broca (<i>Cutting Edge Rounding</i>)
EMD	Modo de decomposição empírico (<i>Empirical Decomposition Mode</i>)
IMF	Função de modo intrínseco (<i>Intrinsic Mode Function</i>)
HHT	Transformada Hilbert-Huang (<i>Hilbert-Huang Transform</i>)
PLB	Quebra da ponta do grafite (<i>Pencil Lead Break</i>)
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo (<i>Lead Titanate Zirconate</i>)
MFC	Composto de macro fibra (<i>Macro Fiber Composite</i>)
MSC	Magnitude quadrática de coerência (<i>Magnitude Square Coherence</i>)

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O polímero reforçado de fibra de carbono (CFRP) vem sendo cada vez mais utilizado nas indústrias de transporte aéreo, terrestre e náutico (Wandowski *et al.*, 2016). O principal motivo que faz o CFRP tão atrativo para indústria é o fato de ser um material que apresenta alta rigidez, baixo peso e alta resistência a fadiga (Altin Karataş & Gökkaya, 2018). Apesar de serem várias as vantagens na utilização deste tipo de material, o CFRP é sensível a impactos, fato que o torna suscetível a um fenômeno de descamação das camadas de fibra, gerando falhas internas de níveis críticos para a estrutura do material. Este fenômeno é conhecido como delaminação, e é responsável por reduzir drasticamente a resistência mecânica de compósitos de CFRP (Barile, 2019). Dentro deste escopo, estudos sobre a integridade estrutural de componentes CFRP são de grande valia, uma vez que este material está cada vez mais inserido em estruturas que não permitem falhas críticas, como em aviões de passageiros e helicópteros militares (Wandowski *et al.*, 2016). Por esta razão, este trabalho tem por objetivo apresentar uma nova abordagem para avaliar a sensibilidade a impulsos mecânicos em placas de CFRP bem como para detecção de falhas estruturais neste tipo de material tendo como base o método de lançamento vertical de esfera metálica. Para tanto, ensaios experimentais foram realizados em uma estrutura de CFRP por meio do lançamento de uma esfera metálica em um mesmo ponto da placa variando a altura de lançamento a fim de avaliar qual a melhor altura a ser utilizada. E então testes de SHM foram performados simulando danos através da adição de elementos metálicos sobre a superfície da placa. Testes semelhantes foram performados em uma estrutura de alumínio de mesmas dimensões para efeito comparativo. Todos os sinais obtidos com os ensaios foram captados por um transdutor piezelétrico do tipo diafragma, aquisitados por um osciloscópio e enviados para o computador, onde uma série de técnicas de processamento digital de sinais foram aplicadas. Estes testes comparativos têm por finalidade avaliar o método de lançamento de esferas metálicas proposto, para que seja utilizado como alternativa a outros métodos reprodutíveis de emissão acústica em testes SHM.

1.2 Objetivos

Este trabalho de pesquisa visa avaliar, por meio comparativo, um inovador método de geração de ondas acústicas baseado no lançamento de uma esfera metálica sobre a superfície de uma estrutura de CFRP, a fim de utilizá-lo como alternativa a outros métodos reprodutíveis de geração acústica, e em testes de detecção de danos por meio de ensaios não destrutivos e técnicas de processamento digital de sinais.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs um novo método reprodutível de geração de ondas acústicas para o monitoramento estrutural do CFRP e do alumínio baseado no lançamento de uma esfera metálica sobre a superfície de ambas as placas. Para tanto, testes foram conduzidos sobre a superfície dos corpos de prova de modo a avaliar a reprodutibilidade do método através de lançamentos consecutivos sobre um mesmo ponto, e posteriormente identificar danos induzidos através da adição de massas sobre a estrutura. Os resultados mostraram que o método proposto possui uma repetibilidade com alto índice de correlação (superior a 95%), o que evidencia a reprodutibilidade do método.

Nos testes de lançamento realizados no CFRP, a análise do espectro em frequência do sinal obtido por meio do cálculo da FFT, apresentou amplitudes significativas para a banda de frequência compreendida entre 0 kHz e 30 kHz. Este fenômeno acontece em decorrência das propriedades mecânicas atenuantes do material compósito. Entretanto, foi possível constatar um aumento na amplitude do sinal à medida que a altura de lançamento aumentava. Por fim, a análise destes testes indicou que a melhor altura de lançamento foi a de 114 mm, pelo fato de proporcionar um manuseio mais fácil da esfera metálica, e por demonstrar o maior índice de correlação médio e menor desvio padrão quando compara com as outras alturas de lançamento utilizadas. Vale ressaltar que o método proposto exibiu índices de reprodutibilidade maiores que do método PLB.

O resultado dos testes de detecção de dano através da adição de massa, mostraram a partir da análise do espectro em frequência do sinal, que o conjunto utilizado para os testes é sensível à variação de massa sobre a superfície das placas. Os resultados mostraram variações na amplitude e no conteúdo em frequência à medida que as massas metálicas eram adicionadas. Porém, apenas através da análise ao longo de todo sinal transiente foi possível encontrar uma banda de frequência para ambos os materiais onde as oscilações de amplitude e frequência eram mais acentuadas. Então, com o cálculo dos índices CCDD e RMSD na banda de frequência selecionada (8 kHz a 16 kHz) foi possível quantificar as variações de amplitude e frequência e constatar que a amplitude dos sinais tendia a variar gradativamente à medida que as massas eram adicionadas sobre as placas. Do mesmo modo, a adição das massas provocou uma defasagem no conteúdo em frequência dos sinais, evidenciado pelo aumento dos valores do índice CCDD à medida que as massas eram adicionadas. As constatações aqui expressas foram observadas para ambos os materiais utilizados como corpo de prova.

Portanto, é possível afirmar que o método proposto em conjunto com as métricas e análises realizadas neste trabalho são capazes de identificar danos induzidos por adição de massa, evidenciando que o método de lançamento de esferas metálicas é adequado para ser aplicado como fonte reprodutível de emissão acústica alternativa a outros métodos de emissão acústica para aplicações em testes não destrutivos de monitoramento da condição estrutural. Estudos posteriores devem ser conduzidos de modo a otimizar as técnicas utilizadas, como avaliar materiais e dimensões diferentes para a esfera lançada e corpo de prova, entre outros.

REFERÊNCIAS

- Altın Karataş, M., & Gökkaya, H. (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>
- Andreades, C., Mahmoodi, P., & Ciampa, F. (2018). Characterisation of smart CFRP composites with embedded PZT transducers for nonlinear ultrasonic applications. *Composite Structures*, 206(July), 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.083>
- Baptista, F. G., Budoya, D. E., de Almeida, V. A. D., & Ulson, J. A. C. (2014). An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. *Sensors (Switzerland)*, 14(1), 1208–1227. <https://doi.org/10.3390/s140101208>
- Barile, C. (2019). Innovative mechanical characterization of CFRP by using acoustic emission technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 210(November 2017), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.024>
- Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., & Paramsamy Kannan, V. (2022). Damage monitoring of carbon fibre reinforced polymer composites using acoustic emission technique and deep learning. *Composite Structures*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115629>
- Caggiano, A., Angelone, R., Napolitano, F., Nele, L., & Teti, R. (2018). Dimensionality Reduction of Sensorial Features by Principal Component Analysis for ANN Machine Learning in Tool Condition Monitoring of CFRP Drilling. *Procedia CIRP*, 78, 307–312. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.072>
- Caggiano, A., Rimpault, X., Teti, R., Balazinski, M., Chatelain, J. F., & Nele, L. (2018). Machine learning approach based on fractal analysis for optimal tool life exploitation in CFRP composite drilling for aeronautical assembly. In *CIRP Annals* (Vol. 67, Issue 1, pp. 483–486). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.035>
- Cao, S., Li, H. N., Huang, W., Zhou, Q., Lei, T., & Wu, C. (2022). A delamination prediction model in ultrasonic vibration assisted drilling of CFRP composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 302(October 2021), 117480. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117480>
- Castro, B., Clerice, G., Ramos, C., Andreoli, A., Baptista, F., Campos, F., & Ulson, J. (2016). Partial discharge monitoring in power transformers using low-cost piezoelectric sensors. *Sensors (Switzerland)*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/s16081266>
- De Almeida, V. A. D., Baptista, F. G., & De Aguiar, P. R. (2015). Piezoelectric transducers assessed by the pencil lead break for impedance-based structural health monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), 693–702. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2352171>
- De Castro, B. A., De Melo Brunini, D., Baptista, F. G., Andreoli, A. L., & Ulson, J. A. C. (2017). Assessment of Macro Fiber Composite Sensors for Measurement of Acoustic Partial Discharge Signals in Power Transformers. *IEEE Sensors Journal*, 17(18), 6090–6099. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2735858>
- de Groot, P. J., Wijnen, P. A. M., & Janssen, R. B. F. (1995). Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy

- composites. *Composites Science and Technology*, 55(4), 405–412.
[https://doi.org/10.1016/0266-3538\(95\)00121-2](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00121-2)
- Faraz, A., Biermann, D., & Weinert, K. (2009). Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(15), 1185–1196.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002>
- Feng, B., Ribeiro, A. L., & Ramos, H. G. (2018). A new method to detect delamination in composites using chirp-excited Lamb wave and wavelet analysis. *NDT and E International*, 100, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.08.004>
- Fernandez, B. O., Aguiar, P. R., Alexandre, F. A., Aulestia Viera, M. A., & Bianchi, E. C. (2020). Study of Knock Sensors as Low-Cost Alternatives to Acoustic Emission Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 20(11), 6038–6045. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2972778>
- Fotouhi, M., & Najafabadi, M. A. (2016). Acoustic emission-based study to characterize the initiation of delamination in composite materials. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(4), 519–537. <https://doi.org/10.1177/0892705713519811>
- Fotouhi, M., Saeedifar, M., Sadeghi, S., Ahmadi Najafabadi, M., & Minak, G. (2015). Investigation of the damage mechanisms for mode I delamination growth in foam core sandwich composites using acoustic emission. *Structural Health Monitoring*, 14(3), 265–280. <https://doi.org/10.1177/1475921714568403>
- Gao, T., Li, C., Wang, Y., Liu, X., An, Q., Li, H. N., Zhang, Y., Cao, H., Liu, B., Wang, D., Said, Z., Debnath, S., Jamil, M., Ali, H. M., & Sharma, S. (2022). Carbon fiber reinforced polymer in drilling: From damage mechanisms to suppression. *Composite Structures*, 286(May 2021), 115232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115232>
- Geier, N., Davim, J. P., & Szalay, T. (2019). Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105552.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105552>
- Giurgiutiu, V. (2016). Structural Health Monitoring of Aerospace Composites. In *Structural Health Monitoring of Aerospace Composites* (pp. 1–23). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409605-9.00001-5>
- Große, C. U. (1996). *Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall*.
- James, R., & Giurgiutiu, V. (2020). Towards the generation of controlled one-inch impact damage in thick CFRP composites for SHM and NDE validation. *Composites Part B: Engineering*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108463>
- Jin, F., & Jin, F. (2021). *in. April*.
- Kerrigan, K., Thil, J., Hewison, R., & O'Donnell, G. E. (2012). An integrated telemetric thermocouple sensor for process monitoring of CFRP milling operations. *Procedia CIRP*, 1(1), 449–454. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.080>
- Khanna, N., Pusavec, F., Agrawal, C., & Krolczyk, G. M. (2020). Measurement and Evaluation of Hole Attributes for Drilling CFRP Composites Using an Indigenously Developed Cryogenic Machining Facility □ Cryogenic drilling of CFRP composites gives better results as compared to dry drilling . □ Cryogenic drilling improve.

- Measurement*, 107504. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107504>
- Lints, M., Salupere, A., & Santos, S. Dos. (2020). Numerical simulation of ultrasonic time reversal on defects in carbon fibre reinforced polymer. *Wave Motion*, 94, 102526. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2020.102526>
- Liu, N., & Schumacher, T. (2020). Improved denoising of structural vibration data employing bilateral filtering. *Sensors (Switzerland)*, 20(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/s20051423>
- Lopes, B. G., Alexandre, F. A., Lopes, W. N., Aguiar, P. R. De, Bianchi, E. C., & Viera, M. A. A. (2019). Study on the effect of the temperature in acoustic emission sensor by the pencil lead break test. *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2018 - Proceedings*, 1226–1229. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627213>
- M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., Kappmeyer, G., Engin, S., & Sim, W. M. (2015). High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(2), 557–580. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.002>
- Matsuzaki, R., & Todoroki, A. (2006). Wireless detection of internal delamination cracks in CFRP laminates using oscillating frequency changes. *Composites Science and Technology*, 66(3–4), 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.07.016>
- Michalcová, L., & Kadlec, M. (2016). Carbon/epoxy composite delamination analysis by acoustic emission method under various environmental conditions. *Engineering Failure Analysis*, 69, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.01.008>
- Minus, M. L., & Kumar, S. (2005). The processing, properties, and structure of carbon fibers. *Jom*, 57(2), 52–58. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0217-8>
- Nakai, M. E., Aguiar, P. R., Guillard, H., Bianchi, E. C., Spatti, D. H., & D'Addona, D. M. (2015). Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics. *Expert Systems with Applications*, 42(20), 7026–7035. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.05.008>
- Potočník, P., Misson, M., Šturm, R., Govekar, E., & Kek, T. (2022). Deep Feature Extraction Based on AE Signals for the Characterization of Loaded Carbon Fiber Epoxy and Glass Fiber Epoxy Composites. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12041867>
- Rosas, J. G., de Waard, H., De Beer, T., Vervaet, C., Remon, J. P., Hinrichs, W. L. J., Frijlink, H. W., & Blanco, M. (2014). NIR spectroscopy for the in-line monitoring of a multicomponent formulation during the entire freeze-drying process. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 97, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2014.04.010>
- Shoja, S., Berbyuk, V., & Boström, A. (2018). Delamination detection in composite laminates using low frequency guided waves: Numerical simulations. *Composite Structures*, 203, 826–834. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.025>
- Soepangkat, B. O. P., Norcahyo, R., Effendi, M. K., & Pramujati, B. (2019). Multi-response optimization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) drilling using back propagation neural network-particle swarm optimization (BPNN-PSO). *Engineering Science and Technology, an International Journal*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.10.002>

- Viera, M. A. A., De Aguiar, P. R., Junior, P. O., Da Silva, R. B., Jackson, M. J., Alexandre, F. A., & Bianchi, E. C. (2019). Low-cost piezoelectric transducer for ceramic grinding monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 19(17), 7605–7612. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2917119>
- Wandowski, T., Malinowski, P. H., & Ostachowicz, W. M. (2016). Delamination detection in CFRP panels using EMI method with temperature compensation. *Composite Structures*, 151, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.056>
- Wei, W., & Qiang, L. (2013). Research on feature extraction of acoustic emission signals in time-domain. *Advanced Materials Research*, 819(4), 171–175. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.819.171>
- Xu, Jie, Wang, W., Han, Q., & Liu, X. (2020). Damage pattern recognition and damage evolution analysis of unidirectional CFRP tendons under tensile loading using acoustic emission technology. *Composite Structures*, 238(January), 111948. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111948>
- Xu, Jinyang, Li, C., Chen, M., El Mansori, M., & Paulo Davim, J. (2020). On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies. *Composite Structures*, 234(November 2019), 111708. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111708>
- NING, Weili. Structural Health Condition Monitoring of Carbon-Fibre Based Composite Materials Using Acoustic Emission Techniques. 2015. 207 f. University of Birmingham, 2015.
- BOEING. A350XWB, EADS Presentation Boeing B787 Dreamliner factsheet. . [S.l: s.n.], 2006.
- J, Hale. Boeing 787 from the Ground Up.
- GROUP ON AVIATION RESEARCH. Flightpath 2050: Europe's Vision for Aviation. . [S.l: s.n.], 2011. Disponível em: <http://ec.europa.eu/transport/modes/air/doc/flightpath2050.pdf> >.