



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 Analyses</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 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Nesta sessão será apresentada uma breve revisão da literatura dos pilares fundamentais do presente estudo, assim como uma breve discussão sobre os materiais utilizados, técnicas e processamento digital de sinais.

2.1 Compósito de fibra de carbono

O CFRP tornou-se um material de utilização generalizado na fabricação moderna dado a sua aplicação em partes vitais à segurança estrutural em bens de consumo duráveis. Ainda assim, a usinagem deste material é cara e complexa, devido ao surgimento de microfissuras e delaminação, carecendo de métodos não destrutivos de monitoramento robustos, simples e acessíveis (Lints *et al.*, 2020).

As fibras de carbono são derivadas de vários precursores, sendo o poliacrilonitrilo o precursor predominante utilizado hoje em dia. Os compósitos de fibras de carbono têm alta resistência (3-7 GPa), alto módulo (200-500 GPa), alta resistência a compressão (1-3 GPa), alto módulo de cisalhamento (10-15 GPa) e baixa densidade (1,75-2,00 g/cm³). Estas fibras se tornaram um material dominante na indústria aeroespacial e seu uso na indústria automotiva e em outras indústrias está crescendo cada vez mais (Minus & Kumar, 2005).

Além disso, os materiais compósitos são cada vez mais utilizados em sistemas de transporte e engenharia civil devido às crescentes restrições de peso e custos de instalação. No caso de sistemas de transporte, como na indústria aeroespacial, o uso de materiais compósitos significa redução do peso, o que reflete no aumento da carga transportável e na redução do consumo de combustível e, portanto, o desempenho mecânico do material é um fator de extrema importância (Potočník *et al.*, 2022). Na Figura 1 é apresentado os locais onde o CFRP é utilizado em uma aeronave A350 XWB da Airbus.

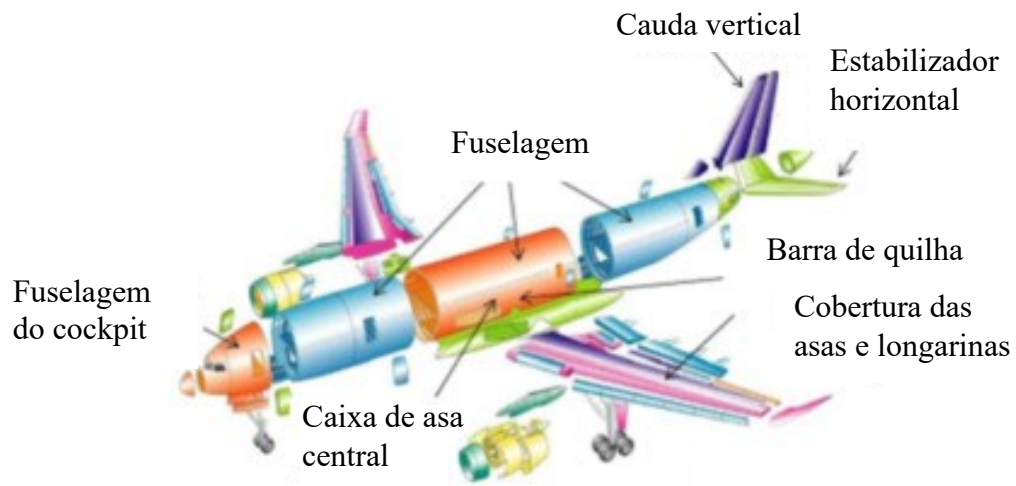


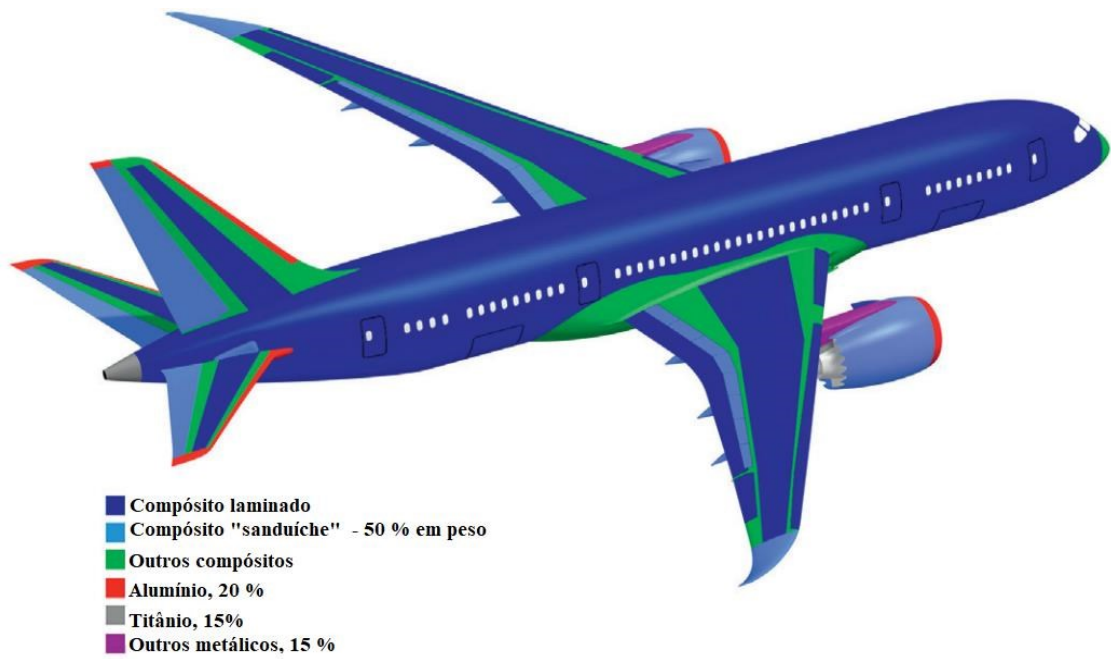
Figura 1 – Estruturas primárias em um A350 XWB onde o CFRP é empregado.

Fonte: Adaptado de (M'Saoubi *et al.*, 2015)

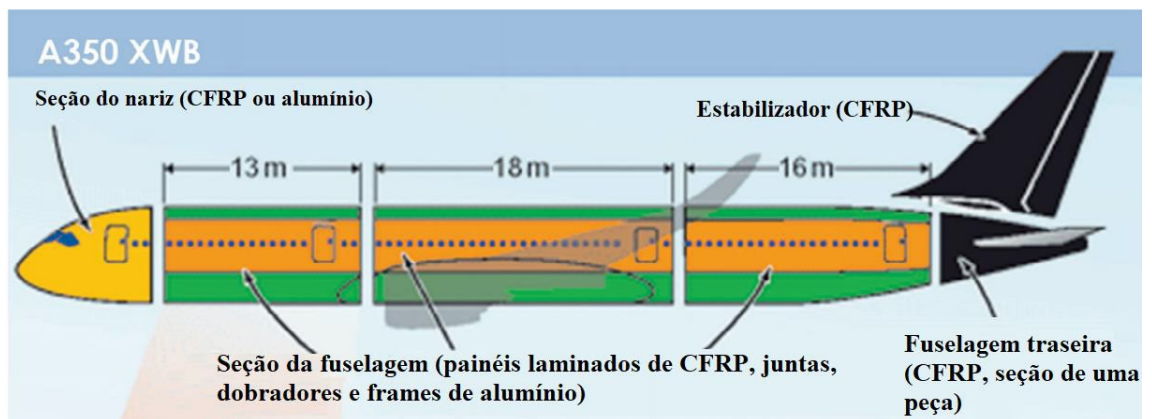
Em um de seus estudos, Khanna *et al.* (2020) reforça a importância do uso de CFRP na indústria, e ainda cita a economia de combustível que é adquirida em veículos que utilizam CFRP em sua composição, devido a ser um material que possui pouco peso e apresenta alta resistência. Porém, apesar de serem inúmeras as vantagens da utilização deste tipo de compósito em substituição a ligas metálicas, vale ressaltar que a natureza abrasiva das fibras e baixa condutividade térmica tornam o CFRP um material de difícil usinagem.

Empresas como a Airbus, Boeing, EMBRAER e Lockheed Martin vêm aumentando de forma significativa o percentual de materiais à base de fibra de carbono reforçada para construção de aeronaves comerciais e militares. Devido a este fato, o setor aeroespacial tem se destacado nos últimos anos em relação a quantidade de compósitos de fibra de carbono utilizados (Boeing, 2006, 2014; Ning, 2015).

Destacam-se, dentre as aeronaves que utilizam compósito de fibra de carbono, o Boeing 787 Dreamliner e o Airbus A350 XWB ilustrados na Figura 2. A aeronave Boeing 787 contém aproximadamente 32 toneladas de compósitos CFRP, feitos a partir de 23 toneladas de fibra de carbono. Os compósitos são usados na fuselagem, asas, cauda, portas e interior. As seções da fuselagem do Boeing 787 são ilustradas na Figura 3 em grandes mandris giratórios. As fibras de reforço são orientadas de maneira a fornecer a máxima resistência possível no caso de carga máxima. Na aeronave Airbus A350 XWB o percentual de compósito é de 53% (Group On Aviation Research, 2011; Ning, 2015).



(a)



(b)

Figura 2 - Composição estrutural: (a) Boeing 787 Dreamliner; e (b) AirbusA350 XWB.

Fonte: Adaptado de (Giurgiutiu, 2016)



Figura 3 - Fuselagem do Boeing 787 e Airbus A350 XWB. Fonte: (Giurgiutiu, 2016)

Na indústria automotiva, o uso de CFRP tem sido predominantemente empregado para a construção de carrocerias de automóveis de corrida, como o Formula 1 e na McLaren P1 modelo monocoque ilustrado na Figura 4, porém os veículos comerciais ainda não recebem este tipo de material em sua estrutura, isso se deve em grande parte ao alto custo de fabricação das fibras de carbono (Jin *et al.*, 2021).



Figura 4 - CFRP empregado na estrutura do modelo monocoque McLaren P1. Fonte: (Jin *et al.*, 2021)

Os processos de montagem que utilizam compósitos de CFRP geralmente são realizados utilizando rebites e parafusos. Para isto é necessário que estas peças sejam submetidas a um processo complexo de furação, uma vez que o surgimento de falhas internas e defeitos que resultem em furos que não atendam as especificações necessárias seja responsável por falhas em toda estrutura (Soepangkat *et al.*, 2019). Dentre os defeitos que podem ocorrer, é comum o surgimento de delaminação nos compósitos, como mostra a Figura 5, através da concentração da tensão entre as camadas resultando na criação de rebarba, assim como danos mecânicos e térmicos na superfície deste material (Jinyang Xu *et al.*, 2020). A delaminação pode causar danos severos até a falha total neste tipo de compósito por reduzir de forma significativa sua resistência. As estatísticas presentes na literatura indicam que até 60% do descarte de CFRP no processo de montagem é devido a delaminação, cerca de 70% dos acidentes de falhas nas aeronaves acontecem nas articulações entre os componentes, sendo que aproximadamente 80% das falhas são geradas em furos (Gao *et al.*, 2022).

Em vista do evidente problema criado pela delaminação em compósitos, Cao *et al.* (2022) propõem um modelo de previsão de delaminação para CFRP utilizando o método de furação assistida por vibração ultrassônica (UVAD). Para tanto, parâmetros como força total de corte e a força de impulso crítica foram calculados para então um critério de tensão nominal máxima ser definido a fim de prever a delaminação. Os resultados mostraram que a combinação de métodos testados neste trabalho dificulta o surgimento de delaminação, tornando possível tratar este problema efetivamente.

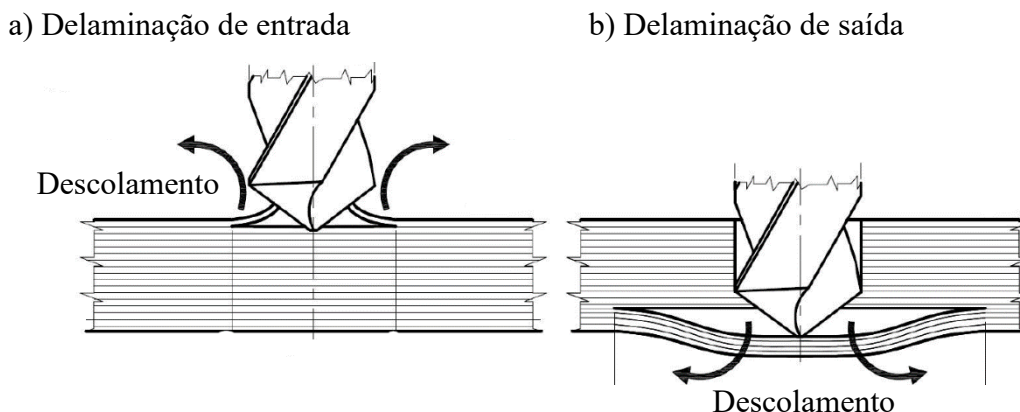


Figura 5 – Delaminação em compósitos de CFRP. Fonte: Adaptado de (Geier *et al.*, 2019)

Diante destes problemas, fica evidente que o processo de manufatura em si pode produzir danos em materiais compósitos, tornando necessário o emprego de técnicas de monitoramento nos estágios de fabricação, como a análise das forças de corte, vibração mecânica e emissão acústica. Atualmente existem dois métodos de monitoramento: o ativo e o passivo. O método ativo consiste em avaliar diretamente as condições da estrutura utilizando algum tipo de sensor ótico e sendo necessário parar o processo de fabricação ou usinagem para que seja realizado as aferições necessárias. Por outro lado, o método passivo baseia-se em utilizar sensores capazes de captar sinais de força, potência e emissão acústica e correlacionar estes sinais com a condição da estrutura monitorada (Nakai *et al.*, 2015).

Na detecção passiva, é comum o uso da técnica de emissão acústica (AE), uma vez que falhas em materiais compósitos geram frequências que podem ser detectadas usando sensores AE (Jie Xu *et al.*, 2020). Diversos estudos têm sido conduzidos para detecção de delaminação em compósitos com base em processamento de sinais de AE, como por exemplo, emprego de counts (Fotouhi *et al.*, 2015), energia cumulativa (Michalcová & Kadlec, 2016), análise em frequência baseada em transformada rápida de Fourier FFT (FFT) (Fotouhi & Najafabadi, 2016), e redes neurais convolucionais (CNN) (Barile *et al.*, 2022). Os métodos ativos, por outro lado, usam transdutores piezelétricos que injetam sinais controlados na estrutura, tais como o

método da impedância eletromecânica (Wandowski *et al.*, 2016), ondas lamb (Feng *et al.*, 2018) e ondas guiadas (Shoja *et al.*, 2018).

Em um estudo sobre monitoramento, Kerrigan *et al.* (2012) apresenta o desenvolvimento de um sistema de medição e monitoramento de temperatura sem fio, acoplado em ferramentas de corte para a avaliação da temperatura em tempo real durante a usinagem de compósitos de CFRP em vista de melhorias na preservação ambiental, devido à economia de energia durante o processo, e melhores resultados ao fim da usinagem deste tipo de compósito. Os resultados apresentados mostram um grande potencial para o uso de tal sensor em processos futuros de monitoramento em tempo real para processos de usinagem de compósitos de CFRP.

No estudo conduzido por James & Giurgiutiu. (2020), os autores realizaram experimentos de impacto em componentes CFRP de diferentes espessuras visando propor uma futura metodologia SHM e NDT para avaliação de danos. Os autores realizaram testes usando um equipamento para geração de impactos conforme padrão de teste ASTM D7136 com propósito de identificar uma combinação de massa, energia e momento para assegurar danos com diâmetro controlado de 1". Os autores verificaram que o dano ocorreu mais facilmente em laminados finos em comparação com laminados mais espessos a partir de testes ultrassônicos e micro-CT de raios-X e perfilometria.

Com o objetivo de realizar o monitoramento da condição da ferramenta durante a furação de laminados de CFRP, Caggiano *et al.* (2018) propôs um método de aprendizagem de máquina baseado na aquisição e processamento de dados a partir da força de impulsão, torque, sinais de emissão e vibração. Para tanto, a partir dos dados coletados, múltiplas características sensoriais são extraídas e utilizadas como paradigmas em uma aprendizagem de máquina baseada em redes neurais artificiais e em uma metodologia de extração de características baseada na análise do componente principal (PCA). Os resultados mostraram que ao fornecer as características do PCA para as redes neurais artificiais foi possível fazer um diagnóstico preciso da condição da ferramenta, possibilitando a implementação no monitoramento em tempo real, de modo a realizar a reposição de ferramenta de maneira mais eficiente.

No estudo conduzido por Matsuzaki & Todoroki. (2006) um método para detectar e quantificar delaminação em CFRP foi proposto com base na análise da resistência elétrica da estrutura em estudo, e baseado também na variação da frequência de ressonância. Para tanto, foi utilizado um microcircuito oscilador wireless de cerâmica.

Em um estudo, Caggiano, Rimpault, *et al.* (2018) apresentara um estudo voltado ao aprendizado de máquina baseado na análise fractal, com a finalidade de identificar e classificar a condição da ferramenta utilizada para furação em compósitos de CFRP durante o processo de

montagem na indústria aeronáutica. Os resultados mostraram que a técnica utilizada possibilitou a substituição de brocas baseada na condição da ferramenta.

Por outro lado, Groot *et al.* (1995) apresentam um estudo utilizando CFRP na forma de um compósito unidirecional, onde os autores o submetem a uma carga sob diferentes condições para determinar o conteúdo em frequência baseado em sinais de emissão acústica. Para tanto é utilizado uma máquina de tração modelo Zwick 1484 com garras hidráulicas de modo a tensionar o compósito em estudo com carga mecânica indo de zero até valores críticos provocando falhas intencionais como rachaduras, descolamento e extração das fibras. E então, através de um sensor PAC modelo WD de banda larga, os sinais acústicos são captados e analisados. Através deste estudo, foi possível concluir que o surgimento de falhas em materiais compósitos gera frequências que podem ser facilmente detectadas usando equipamento de ultrassom, e que cada tipo de mecanismo de falha gera frequências específicas e identificáveis.

Em um estudo sobre a condição da ferramenta durante a furação de compósitos de CFRP Faraz *et al.* (2009) apresentam a furação como a operação mais frequentemente utilizada na indústria, sendo que aproximadamente são necessários 55.000 furos na produção de uma única unidade de um Airbus A350. Portanto, devido à natureza altamente abrasiva do CFRP, o desgaste da ferramenta durante o processo de furação é um problema a ser enfrentado. O arredondamento da ponta da broca, do inglês *Cutting edge rounding* (CER), é estudado como uma nova característica de desgaste de ferramenta, e pode ser um fator determinante para o surgimento de problemas no furo, como a delaminação. Para tanto quatro tipos diferentes de brocas, de mesmo diâmetro, foram utilizadas de modo a investigar, através de testes de furação, correlações entre o CER, os esforços mecânicos exercidos (como a força de impulsão e torque) e os resultados quantitativos de delaminação geradas após o processo. Os resultados revelaram que este novo tipo de desgaste se desenvolve de forma quase similar para as quatro ferramentas selecionadas e é praticamente independente de seus padrões convencionais de desgastes laterais. Além disto, os esforços mecânicos utilizados e o CER são altamente correlacionáveis, assim como os resultados quantitativos de delaminação e o CER.

Em vista do evidente problema causado pela delaminação proveniente de processos de usinagem em CFRP, Feng *et al.* (2018) propõem um método de identificação e detecção de delaminação em compósitos de fibra de carbono baseado na utilização de ondas *lamb*. Para esta finalidade, os autores excitaram quatro placas de CFRP distintas com ondas *lamb* de distintos comprimentos de onda. Das quatro placas utilizadas, três possuíam delaminação de diferentes comprimentos e uma estava intacta. Os resultados deste trabalho mostraram que para cada comprimento de delaminação específico, apenas alguns componentes de frequência são

perturbados, e a menor frequência perturbada a partir de uma delaminação diminui consideravelmente à medida que o comprimento da delaminação aumenta.

O estudo conduzido por Wei & Qiang (2013) apresenta um estudo visando identificar as características do sinal associado à propagação de danos para cada modo de falha em um laminado de fibra de carbono reforçado com fio trançado sob carga de tração. A análise tempo-frequência dos sinais de EA foi realizada utilizando o Modo de Decomposição Empírico (EMD). Os sinais de EA foram decompostos em um conjunto de componentes de Função de Modo Intrínseco (IMF), e então os sinais AE foram pós-processados usando a Transformada Hilbert-Huang (HHT) para extrair a característica de danos dos compósitos. Foi demonstrado que a característica de frequência dos sinais de EA poderia estar diretamente relacionada com os modos de dano dos materiais, respectivamente.

Apesar das realizações existentes da literatura, diversas lacunas ainda não foram preenchidas uma vez que o monitoramento por sensores de estruturas CFRP ainda se encontra em seu estágio inicial e estudos aprofundados se fazem necessários para melhor compreensão dos mecanismos de danos e sua correlação com sinais acústicos. Um dos desafios é a natureza anisotrópica do CFRP que por vezes afeta negativamente a extração de características relacionadas a ocorrência de danos em sinais acústicos devido o sinal de AE apresentar baixas frequências.

2.2 Pencil Lead Break (PLB)

O método da quebra do grafite (*Pencil Lead Break* – PLB) é uma técnica consolidada utilizada como fonte reprodutível de emissão acústica (De Almeida *et al.*, 2015). Este método consiste em quebrar a ponta de um grafite sobre a superfície de uma estrutura, como mostra a Figura 6. A quebra do grafite gera um impulso e, consequentemente, um sinal de banda larga que pode ser captado por sensores instalados na superfície do corpo de prova (B. Castro *et al.*, 2016).

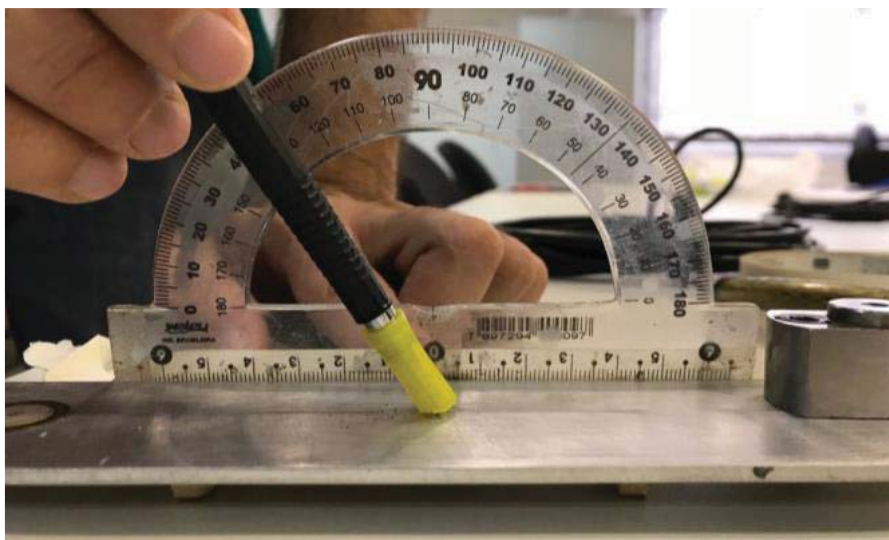


Figura 6 – Teste PLB efetuado sobre uma placa de alumínio. Fonte: Adaptado de (Lopes *et al.*, 2019)

Vale ressaltar que o método PLB é muito eficiente na caracterização de sensores de emissão acústica. Em um de seus trabalhos Lopes *et al.* (2019) utilizou esta técnica para avaliar o efeito da variação de temperatura na resposta de sensores de emissão acústica através de técnicas de processamento digital de sinais. Para tanto, testes de PLB foram realizados sobre a superfície de uma peça de aço ABNT 1020 em diferentes temperaturas. Um forno elétrico e um refrigerador foram utilizados para variar a temperatura da peça de aço. Os resultados deste trabalho mostraram que a elevação da temperatura pode alterar a resposta característica dos sensores utilizados, levando até mesmo a falsos diagnósticos.

No estudo conduzido por Fernandez *et al.* (2020), os autores avaliaram a viabilidade do uso de *Knock sensors* como uma alternativa de baixo custo a sensores de emissão acústica no monitoramento de processos de manufatura. De modo a avaliar esta nova abordagem, testes PLB e testes de usinagem foram realizados em diferentes condições de cortes, e então os sinais do *knock sensor* e do sensor de emissão acústica foram analisados e correlacionados para avaliar a sensibilidade do processo e a resposta espectral. Inicialmente, as frequências de ressonância e antirressonância foram determinadas para o *knock sensor*, e então testes de PLB foram realizados de maneira a caracterizar o *knock sensor* em diferentes temperaturas, ou seja, determinar a resposta em frequência e a influência da temperatura. Os resultados mostraram uma coerência superior a 80% entre os resultados obtidos através do sensor de emissão acústica e o *knock sensor* a partir dos testes de PLB.

No trabalho de De Almeida *et al.* (2015) foram realizados testes em vigas de alumínio de diferentes tamanhos e dois tipos de transdutores: PZT (titanato de zirconato de chumbo) piezocerâmicas e MFC (composto de macro fibra). O transdutor MFC foi inventado pelo NASA

Langley Research Center em 1996 e consiste em hastes piezocerâmicas retangulares coladas entre camadas de adesivo, eletrodos interdigitados e filme de poliimida. Para cada tipo de transdutor e barra de alumínio, a assinatura de impedância elétrica e o sinal de tensão obtido usando o método PLB foram medidos e analisados. O sinal obtido pelo método PLB foi analisado no domínio da frequência com base na densidade espectral de potência (PSD) e foi comparado com a sensibilidade teórica do transdutor utilizado para a detecção de danos. Os resultados indicam uma relação clara entre o PSD obtido pelo método PLB e a variação das assinaturas de impedância elétrica do transdutor devido a danos estruturais.

2.3 Técnicas de processamento digital de sinais

Para uma seleção e extração apropriada das características representativas no monitoramento estrutural, faz-se necessário o uso de técnicas avançadas de processamento digital de sinais. As principais técnicas cobertas pelo escopo do presente trabalho são descritas a seguir.

2.3.1 RMS

O RMS (*root mean square*) calcula o valor eficaz do sinal, é uma das mais importantes métricas utilizadas para avaliar o sinal captado por sensores de emissão acústica. Esta abordagem pode ser considerada como a representação da intensidade sonora que está diretamente relacionada com a tensão aplicada ao sensor (B. A. De Castro *et al.*, 2017).

O método utilizado para cálculo pode ser expresso pela Equação 1.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x^2(i)} \quad (1)$$

Onde N é o tamanho do bloco de dados e x(i) é o enésimo elemento do sinal x (Viera *et al.*, 2019).

2.3.2 Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação faz uma comparação ponto a ponto de dois vetores distintos e gera uma medida de similaridade que apresenta o quanto os dois vetores analisados se correlacionam (Rosas *et al.*, 2014). O cálculo do coeficiente de correlação pode ser observado na Equação (2).

$$Cc = \sum_{k=0}^n \frac{\sum_{k=1}^N (x_i(k) - \bar{x}_i) - (x_j(k) - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (x_i(k) - \bar{x}_i)^2} - \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_j(k) - \bar{x}_j)^2}} \quad (2)$$

Sendo que x_i representa o primeiro vetor, e x_j o segundo vetor a serem comparados ponto a ponto. Portanto $\bar{x}_i$ e $\bar{x}_j$ representam os valores médios destes vetores (B. A. De Castro *et al.*, 2017).

2.3.3 Desvio médio quadrático

O RMSD é diretamente ligado as amplitudes dos sinais obtidos e quantifica a diferença entre *baseline* e peça danificada (LOPES *et al.*, 2019). O cálculo do RMSD é dado pela Equação (3).

$$RMSD = \sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[X_D(k) - X_H(k)]^2}{X_H^2(k)}} \quad (3)$$

Os índices H e D indicam a peça em condição intacta e danificada, portanto $X_H(k)$ e $X_D(k)$ são as assinaturas espectrais de frequência da estrutura sem danos, e da estrutura submetida a alguma avaria, respectivamente.

2.3.4 Desvio do coeficiente de correlação

O CCDM indica deslocamentos nas respostas em frequência obtidas pelo sensor (Baptista *et al.*, 2014). Seu cálculo é dado através da Equação (4).

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_{\omega_I}^{\omega_F} [X_H(k) - \bar{X}_H][X_D(k) - \bar{X}_D]}{\sqrt{\sum_{\omega_I}^{\omega_F} [X_H(k) - \bar{X}_H]^2} \sqrt{\sum_{\omega_I}^{\omega_F} [X_D(k) - \bar{X}_D]^2}} \quad (4)$$

Sendo que os índices que se diferem dos já mencionados, são $(\bar{X}_H)$ e $(\bar{X}_D)$, que indicam a média dos espectros de frequência sob condições íntegra e danificada.

Tendo sido contextualizado um dos pilares que sustentam o desenvolvimento do presente projeto, são apresentados nas próximas seções os conceitos fundamentais relativos aos métodos, técnicas, ferramentas e material necessário para condução da investigação científica.

CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo os materiais e equipamentos utilizados, bem como, a metodologia empregada para realização dos ensaios experimentais, são detalhados. A princípio são apresentados os testes realizados para na estrutura de CFRP, começando pelos testes de PLB, assim como sua configuração experimental e procedimentos realizados. Após estas subseções é apresentado o banco de ensaios e os procedimentos realizados para os testes de lançamento de esfera. E então uma análise de danos é apresentada para averiguar se não há danos provenientes do impacto da esfera na superfície do CFRP. As subseções seguintes são relacionadas aos testes realizados na placa de alumínio seguindo a mesma divisão de subseções feita para os testes realizados no CFRP.

3.1 Testes de PLB e testes de lançamento de esfera no material a base de CFRP

3.1.1 Configuração experimental para os testes de PLB

O ponto de partida deste trabalho foi efetuar testes utilizando o método PLB. Para tanto um grafite de 0,5 mm de espessura e 3 mm de comprimento do tipo 2H foi utilizado em conjunto com uma lapiseira da fabricante Pentel®. Este conjunto foi disposto em um ponto ao centro da placa de CFRP em 45° com sua superfície. A 210 mm deste ponto, em uma das bordas da placa, encontra-se um transdutor piezelétrico de 20 mm de diâmetro e 0,3 mm de espessura.

3.1.2 Procedimentos experimentais

Tais testes foram performados cinco vezes no ponto definido a 210 mm do transdutor piezelétrico e mais cinco vezes em um ponto a 70 mm de distância do transdutor piezelétrico. O ponto mais próximo do transdutor foi chamado de posição 1, e o ponto a 210 mm do transdutor foi denominado posição 2. Vale ressaltar que o coeficiente de correlação foi calculado para todos os testes feitos no domínio do tempo para todos as combinações de pares de testes possíveis e então uma média de cada posição foi calculada e podem ser observados na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 – Média e desvio padrão dos coeficientes de correlação do PLB

Posições	Coeficiente de Correlação	
	Média	Desvio Padrão
Posição 1	0,9269	0,0480
Posição 2	0,9250	0,0543

Tabela 2 – Coeficiente de correlação dos testes de PLB

Combinação de testes	Coeficiente de Correlação	
	Posição 1	Posição 2
Teste 1 x Teste 2	0,9695	0,8769
Teste 1 x Teste 3	0,9342	0,9942
Teste 1 x Teste 4	0,8857	0,8684
Teste 1 x Teste 5	0,8761	0,8962
Teste 2 x Teste 3	0,9728	0,8802
Teste 2 x Teste 4	0,8715	0,8804
Teste 2 x Teste 5	0,9445	0,9880
Teste 3 x Teste 4	0,8621	0,9779
Teste 3 x Teste 5	0,9789	0,9883
Teste 4 x Teste 5	0,9741	0,8994

3.1.3 Configuração experimental para os testes de lançamento de esfera

O método de lançamento de esfera metálica foi proposto como meio alternativo ao método PLB, para tanto, testes experimentais foram realizados utilizando um mecanismo magnético de lançamento de esferas metálicas sobre o corpo de prova. Cada teste consiste em lançar uma esfera metálica de 6,3 mm de diâmetro e $1,046 \pm 0,006$ g na superfície de uma placa de CFRP, como em (9) na Figura 7.

Para simular danos sobre a estrutura da placa, cinco porcas metálicas hexagonais de 6,2 mm de diâmetro e $0,54 \pm 0,02$ g, como em (8) na Figura 7, foram fixadas uma a uma sobre a superfície do corpo de prova a 105 mm do diafragma piezelétrico, como em (4) na Figura 7.

O mecanismo de lançamento consiste em uma estrutura de madeira na qual há anexado um trilho metálico com 54 cm de altura. Ligado ao trilho, encontra-se um eletroímã envolto por um encapsulamento plástico, ilustrado em (6) na Figura 7, e energizado por uma fonte de tensão regulável, como em (7) na Figura 7. Visando ajustar a altura de lançamento de maneira fácil e precisa, foi utilizado um ímã de neodímio incorporado ao encapsulamento do eletroímã de maneira a permitir o deslocamento do mesmo ao longo do trilho metálico verticalmente. O mecanismo descrito acima pode ser observado detalhadamente na Figura 7.

Cinco blocos de alumínio, com 38 mm de comprimento cada, foram utilizados como gabarito para assegurar que os testes seriam realizados com o mesmo deslocamento de altura,

como em (10) na Figura 7. Uma sexta altura foi definida posteriormente utilizando o tamanho máximo do trilho metálico como base, para efeitos comparativos.

O corpo de prova é composto de uma placa de CFRP de $448 \pm 0,1$ mm de comprimento, 106,3 mm de largura e $5,5 \pm 0,06$ mm de espessura, como em (3) na Figura 7. Sob esta placa foi disposto um bloco de espuma com 9 mm de espessura para evitar qualquer interferência indesejada proveniente do ambiente, como em (5) na Figura 7. Um transdutor piezelétrico do tipo diafragma, com dimensões de 20 mm de diâmetro e 0,3 mm de espessura, foi fixado ao centro da placa a $25,5 \pm 0,15$ mm da extremidade da estrutura, utilizando uma cola a base de cianoacrilato de etila, como em (2) na Figura 7.

Um osciloscópio modelo DL850 da Yokogawa®, com ilustrado em (1) na Figura 7, foi utilizado para coletar os sinais proveniente dos testes à uma taxa de aquisição de 10 MS/s. Após a aquisição dos sinais, foi utilizado um computador, para armazenar e processar os sinais obtidos através do osciloscópio.

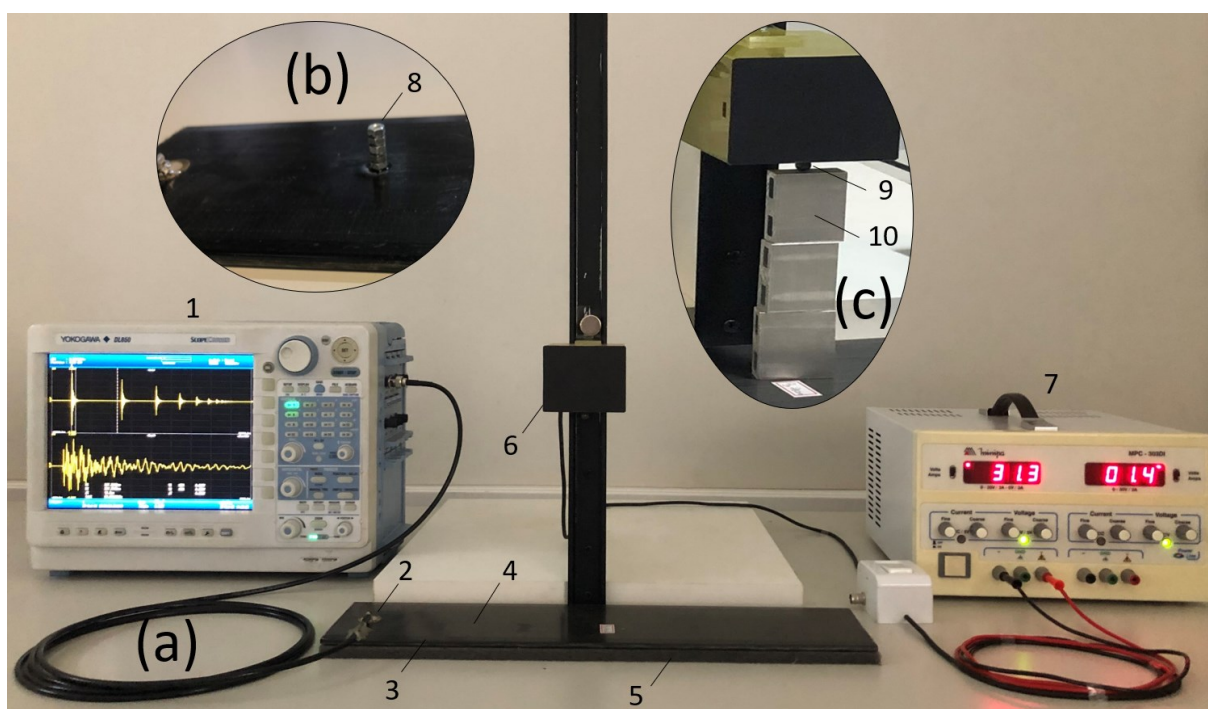


Figura 7 – Banco de ensaios

3.1.4 Procedimentos experimentais para o método de lançamento de esfera

Os testes em CFRP foram realizados baseados na alteração da altura de lançamento, para tanto foram utilizadas cinco peças de alumínio de mesmo tamanho como gabaritos. Cada peça de alumínio definiu uma altura de lançamento, totalizando cinco alturas, e então uma sexta altura foi definida utilizando o tamanho máximo do trilho metálico como gabarito. Para cada

altura definida foram feitas cinco repetições de lançamento e então o coeficiente de correlação foi calculado para apontar, através do índice de correlação, a similaridade entre as repetições dos lançamentos em cada uma das seis alturas. Para tal, foram criados seis vetores, cada um contendo os dados das cinco repetições feitas em cada altura. Em cada um dos vetores foi calculado o coeficiente de correlação, e então a média e o desvio padrão entre os resultados obtidos foram extraídos, como mostra a Tabela 3.

Posteriormente foi realizado o cálculo da FFT e do RMS e então uma média dos resultados de cada métrica foi calculada, pois foi constatado um alto índice de correlação entre os resultados, portanto o cálculo da média não interfere nos resultados e facilita a visibilidade do comportamento do sinal. Vale ressaltar que todos os testes foram executados em ambiente controlado sob temperatura constante e igual a 25 ± 2 °C.

Tabela 3 – Média e desvio padrão dos coeficientes de correlação

Altura de Lançamento	Coeficiente de Correlação	
	Média	Desvio padrão
38 mm	0,9972	0,0024
76 mm	0,9994	0,00014
114 mm	0,9997	0,00003
152 mm	0,9995	0,00026
190 mm	0,9995	0,00027
490 mm	0,9990	0,00073

3.1.5 Avaliação prévia de danos no CFRP

Precedendo os ensaios descritos na sessão anterior, foram realizados testes visando avaliar se o impacto da esfera na superfície do CFRP não causaria danos ao material. Para tanto, foram efetuados dez lançamento consecutivos em três alturas diferentes (114, 152 e 190 mm) com a mesma esfera de 6,3 mm utilizada nos outros testes e, utilizando um microscópio digital da marca Inskam, 30 W e 1000 x, foi possível obter imagens precisas da condição da placa antes, e após o impacto da esfera. Estas imagens podem ser observadas na Figura 8.

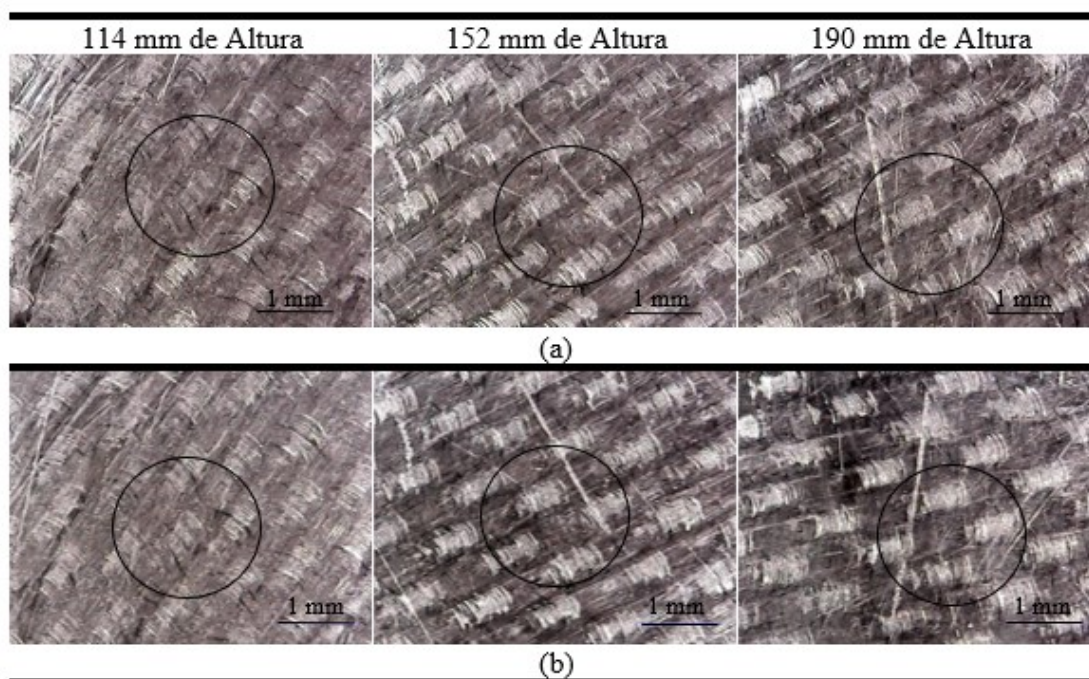


Figura 8 – Análise de impacto em CFRP: (a) antes; (b) depois

Ao analisar as imagens obtidas pelo microscópio, é possível assegurar que nenhum dano foi detectado após os lançamentos terem sido efetuados no mesmo local. A área de impacto está demarcada por um círculo, e representa onde a esfera deve tocar a superfície do CFRP antes e depois do lançamento.

3.2 Testes de PLB e testes de lançamento de esfera no material a base de alumínio

3.2.1 Configuração experimental para os testes de PLB

Assim como na estrutura de CFRP, testes de PLB foram realizados sobre a superfície de uma placa de alumínio com as mesmas dimensões da placa de CFRP. Para tanto foi utilizado uma lapiseira da marca Pentel® com um grafite do tipo 2H de espessura 0,5 mm e 3mm de comprimento. Além disso, foi utilizado diafragma piezelétrico de 20 mm de diâmetro foi fixado ao centro da placa, a $25,5 \pm 0,21$ mm da extremidade, assim como foi feito no CFRP. Todos os dados foram armazenados por um osciloscópio modelo DL850 da Yokogawa® a uma taxa de aquisição de 10 MS/s.

3.2.2 Procedimentos experimentais

Três testes foram realizados a uma distância de 210 mm do diafragma piezelétrico. Os testes foram executados quebrando o grafite em um ângulo de 45° com a superfície da placa de alumínio. Os testes foram captados pelo diafragma piezelétrico e armazenado pelo osciloscópio. Após a coleta dos dados, o coeficiente de correlação foi calculado para estes

testes, de modo a averiguar se os sinais brutos obtidos possuem semelhança quando comparados ponto a ponto. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficiente de correlação para ensaios de PLB no alumínio

	Coeficiente de correlação
Teste 1 e teste 2	0,9934
Teste 1 e teste 3	0,9851
Teste 2 e teste 3	0,9918

Os coeficientes apresentados acima mostram que todos os testes de PLB apresentam sinais altamente similares, o que comprova que a repetição dos testes foi bem executada e que o diafragma piezelétrico responde de maneira satisfatória ao impulso gerado com a quebra do grafite neste material.

3.2.3 Configuração experimental para os testes de lançamento de esfera

Para avaliar a abordagem proposta em um material diferente, visando validar o método empregado, foram performados lançamentos verticais consecutivos na superfície de uma estrutura de alumínio com as mesmas dimensões da estrutura de CFRP utilizada anteriormente. Para tanto, foram utilizados o mesmo mecanismo de lançamento, e a mesma esfera metálica descritos nas seções anteriores. Além disso um diafragma piezelétrico de 20 mm de diâmetro foi fixado ao centro da placa, a $25,5 \pm 0,21$ mm da extremidade.

3.2.4 Procedimentos experimentais para o método de lançamento de esfera

Os testes consistiram em lançar a esfera metálica sete vezes consecutivas a uma altura de 114 mm. O ponto de impacto da esfera com a superfície do alumínio está localizado a 210 mm de um diafragma piezelétrico. A altura de 114 mm foi escolhida após ser constatado uma melhor repetibilidade nos lançamentos efetuados desta altura na estrutura de CFRP. Tais índices de repetibilidade estão apresentados na Seção 3.1.4.

Os sinais coletados dos testes performados em alumínio foram comparados com os sinais obtidos nos testes em CFRP, para extrair características comparativas de ambos os ensaios, bem como sua repetibilidade e conteúdo em frequência.

Todos os testes aqui descritos foram performados a uma temperatura constante igual a 25 ± 2 °C.

3.2.5 Avaliação prévia de danos na placa de Alumínio.

Para avaliar os efeitos do impacto da esfera metálica na placa de alumínio, ensaios prévios foram performados precedendo os testes descritos nas seções anteriores. Para tanto

foram utilizadas duas esferas, uma de 6,3 mm de diâmetro e $1,046 \pm 0,006$ g e a segunda esfera com 3,9 mm de diâmetro e $0,25 \pm 0,01$ g para efeitos comparativos. As imagens obtidas com o microscópio digital podem ser analisadas na Figura 9.

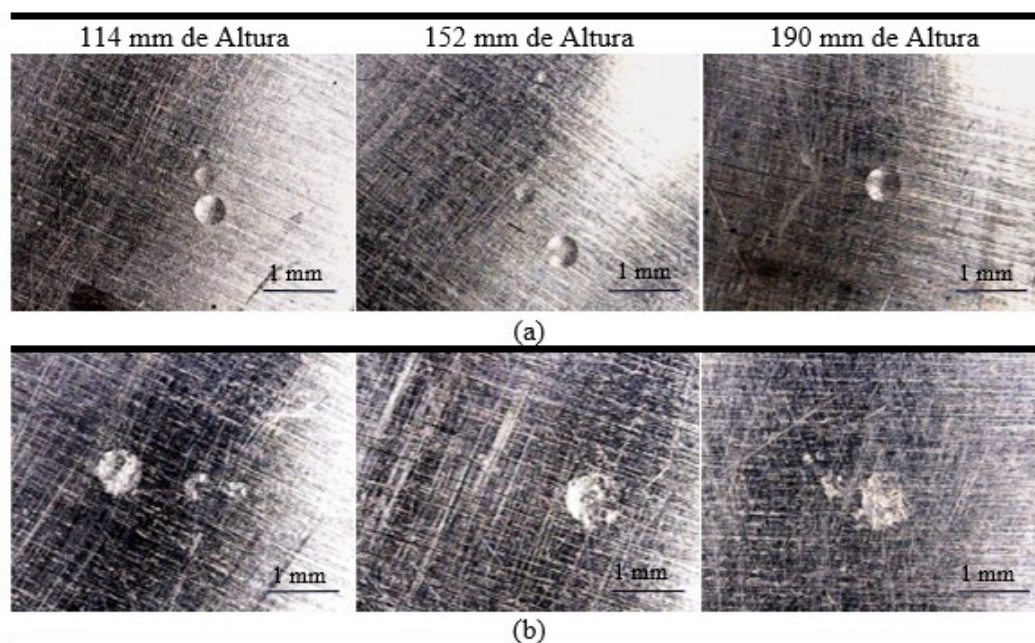


Figura 9 – Análise de impacto em alumínio: (a) esfera de 3,9 mm; (b) esfera de 6,3 mm

Como é possível observar, o impacto da esfera com a superfície do alumínio causa danos visíveis com aproximadamente 0,5 mm de diâmetro. A esfera menor demarca perfeitamente sua circunferência quando toca o alumínio, entretanto a esfera maior aparenta causar um dano mais severo na superfície do alumínio, conforme esperado. As demarcações menores ao redor da área de impacto são devido ao ricochete da esfera ao tocar a placa de alumínio.

3.3 Ensaios de monitoramento de integridade estrutural

3.3.1 Configuração experimental

Em vista das constatações obtidas anteriormente, foram realizados testes de lançamento de esfera variando a massa das placas de CFRP e alumínio utilizadas anteriormente através de adição de material em sua superfície. Visando simular danos por meio da variação da massa, em cada uma das placas, foram adicionadas cinco porcas metálicas, sobrepostas uma a uma, de massa e diâmetro semelhantes (medições completas descritas no Apêndice A) e para cada adição, cinco lançamentos foram efetuados a uma altura de 114 mm em um ponto a 210 mm de distância do diafragma piezelétrico, como nos ensaios que precederam a este. Antes da adição das massas, cinco lançamentos foram efetuados para se obter a *baseline* de cada uma das placas. Todos os ensaios foram realizados a uma temperatura constante de $24 \pm 2^\circ\text{C}$. As

porcas foram fixadas com auxílio de cola a base de cianoacrilato de etila, no ponto a 105 mm de distância do diafragma piezelétrico. Vale ressaltar que o diafragma piezelétrico, assim como sua localização permanecem as mesmas descritas nos ensaios que antecederam a este, como mostra a Figura 10. A massa das porcas utilizadas, assim como seus diâmetros internos e externos, espessura, e dimensões do diafragma piezelétrico estão expressos no Apêndice A deste trabalho.



Figura 10 – Placa de CFRP com adição de massa

Após a coleta e armazenamento das ondas geradas através dos arremessos de esfera, os sinais foram enviados para um computador, onde com o auxílio do software MATLAB®, foi possível analisar os sinais no domínio do tempo e então aplicar a FFT em cada um dos sinais. Para facilitar a análise e compreensão dos dados, após realizada a FFT, uma média dos cinco sinais obtidos para condição da peça foi calculada, assim como para os valores RMS calculados a partir dos sinais brutos. A magnitude quadrática de coerência e o coeficiente de correlação foram índices também utilizados e calculados a partir do software MATLAB® para avaliar a repetibilidade de todos os testes executados, bem como a validação das repetições. Os Índices CCDDM e RMSD foram calculados posteriormente para avaliar a defasagem em frequência dos sinais e as diferenças de amplitude obtidas após a adição dos danos sobre as placas em estudo, com a finalidade de evidenciar a detecção dos danos.

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultado obtidos com os testes realizados na estrutura de CFRP

Nesta seção são apresentados todos os resultados obtidos através dos ensaios realizados na estrutura de CFRP.

4.1.1 Resultados utilizando o método PLB

Os espectros de frequência médios referentes aos testes de PLB descritos nas seções anteriores estão ilustrados na Figura 11. Uma variação na amplitude baseada no ponto onde o teste é realizado pode ser observada, onde as amplitudes são maiores para os testes realizados na posição 1 (70 mm) em algumas bandas de frequências, como mostra a amplificação feita na Figura 11 da banda de frequência compreendida entre 0 e 3 kHz. É possível constatar atividade espectral até aproximadamente 25 kHz, especialmente entre 0 e 10 kHz onde as amplitudes são maiores. Este fato se dá devido a composição do próprio CFRP, pois seu interior está repleto de pequenas lacunas entre fibra e interfase, ou entre a disposição das fibras, tornando o CFRP um material com propriedades atenuantes (Geier *et al.*, 2019). O mesmo teste executado em outros materiais apresenta amplitudes maiores e bandas de frequência mais amplas, como pode ser observado nas próximas seções. Vale ressaltar que os resultados mostraram que o diafragma piezelétrico em conjunto com a placa de CFRP são sensíveis ao impacto gerado pela quebra do grafite na superfície da placa. Dentro deste escopo, vale salientar que o CFRP é um material heterogêneo e anisotrópico, ou seja suas propriedades mecânicas e elásticas dependem principalmente da direção, e sua densidade bem inferior à dos metais, o que faz com que as ondas lamb periféricas dispersivas e flexurais se propaguem facilmente na sua superfície. Além disso as ondas acústicas que se propagam no compósito estão sujeitas a dispersão ou atenuação, mesmo que todo sistema seja perfeitamente elástico.

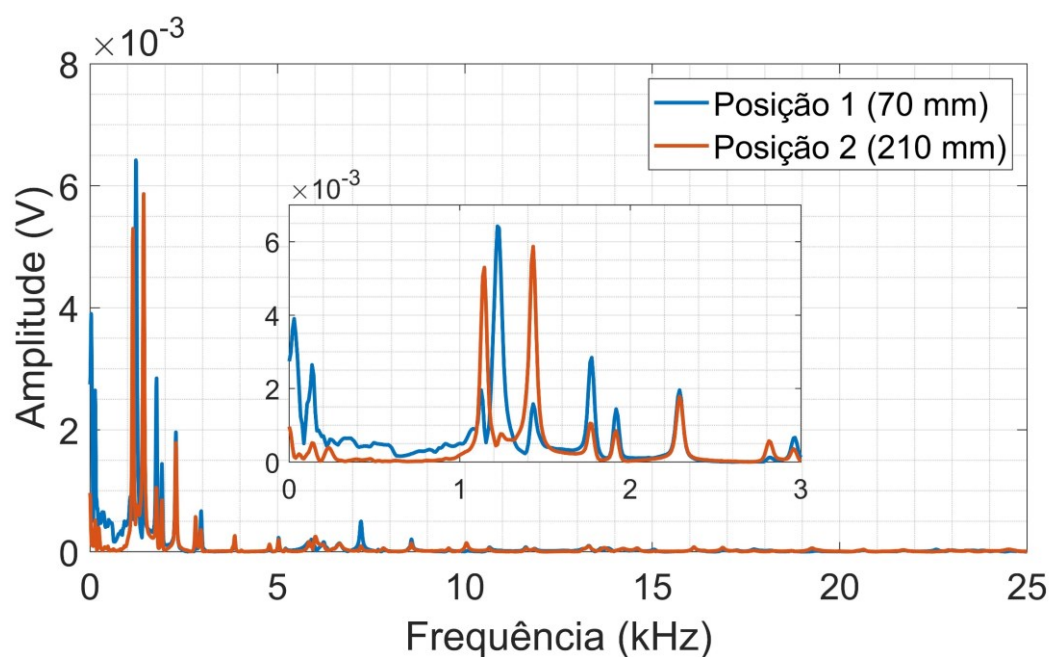


Figura 11 – Espectro de frequência médio dos testes PLB

Para quantificar a coerência entre as repetições, foi calculada a magnitude quadrática de coerência (MSC), que consiste em comparar dois vetores e quantificar entre 0 e 1 a coerência entre eles operando no domínio da frequência (Liu & Schumacher, 2020). O MSC foi originalmente proposto por Grosse ⁽¹⁹⁹⁶⁾ para comparar sinais de emissão acústica. O cálculo do MSC para as duas posições de teste pode ser observado com mais detalhes na Figura 12 e na Figura 13.

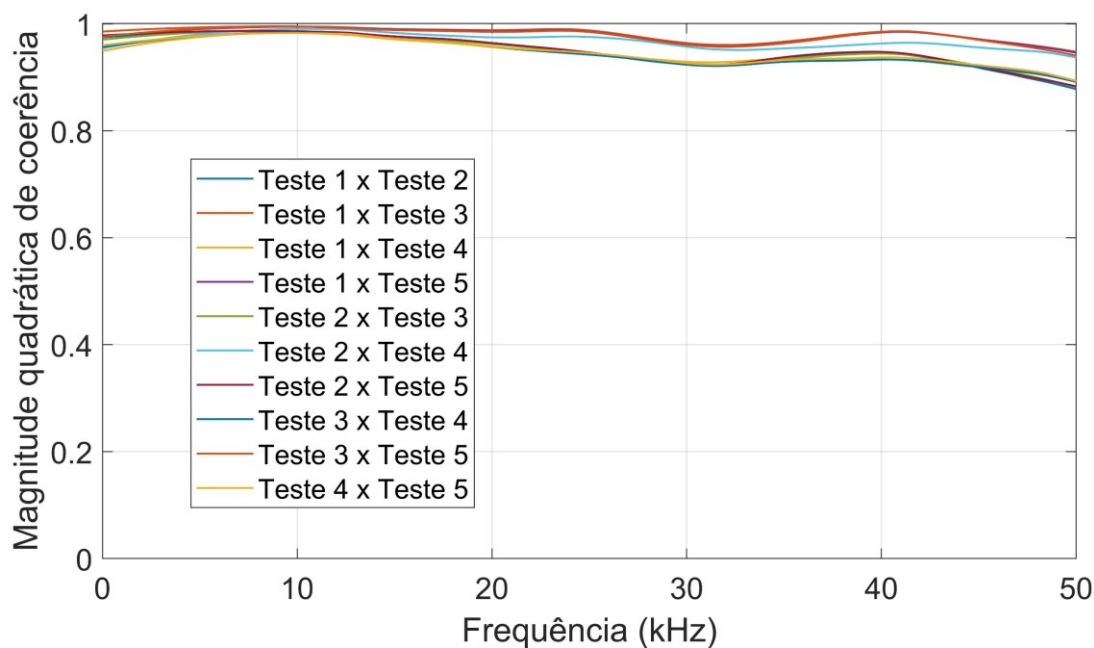


Figura 12 – MCS para testes de PLB feitos na posição 1.

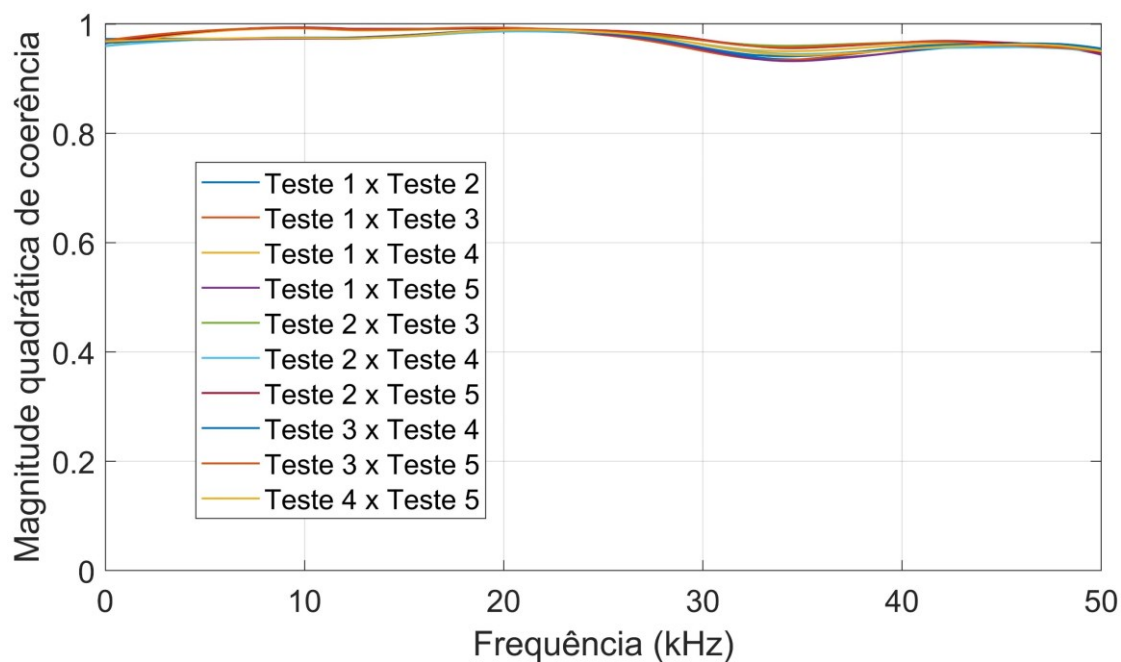


Figura 13 - MCS para testes de PLB feitos na posição 2.

O MSC obtido para os testes de PLB apresenta índices de coerências de aproximadamente 0,98 até a frequência 25 kHz, onde começam a decair, porém mantendo o MSC acima de 0,9, o que evidencia a similaridade entre os testes efetuados.

Na Figura 14 mostra o MSC dos testes de PLB para um par de sinais em cada uma das duas posições em uma faixa de frequência de 0 a 260 kHz.

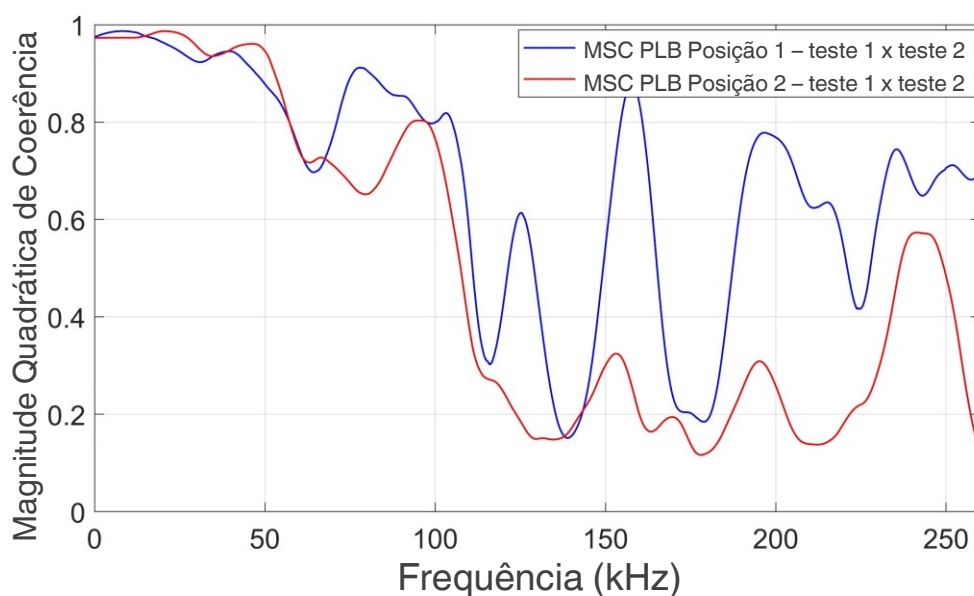


Figura 14 - MSC do PLB em CFRP de 0 a 260 kHz

A análise desta faixa de frequência mais ampla evidencia que a atividade espectral ainda é presente em frequências mais altas, superiores a 60 kHz, porém devido a características anisotrópicas do CFRP, a coerência entre os testes nestas frequências é comprometida.

4.1.2 Resultados utilizando o método de lançamento de esfera metálica

Para os sinais obtidos com ensaios efetuados na estrutura de CFRP, espectros foram obtidos com o cálculo da FFT, e podem ser observados na Figura 15.

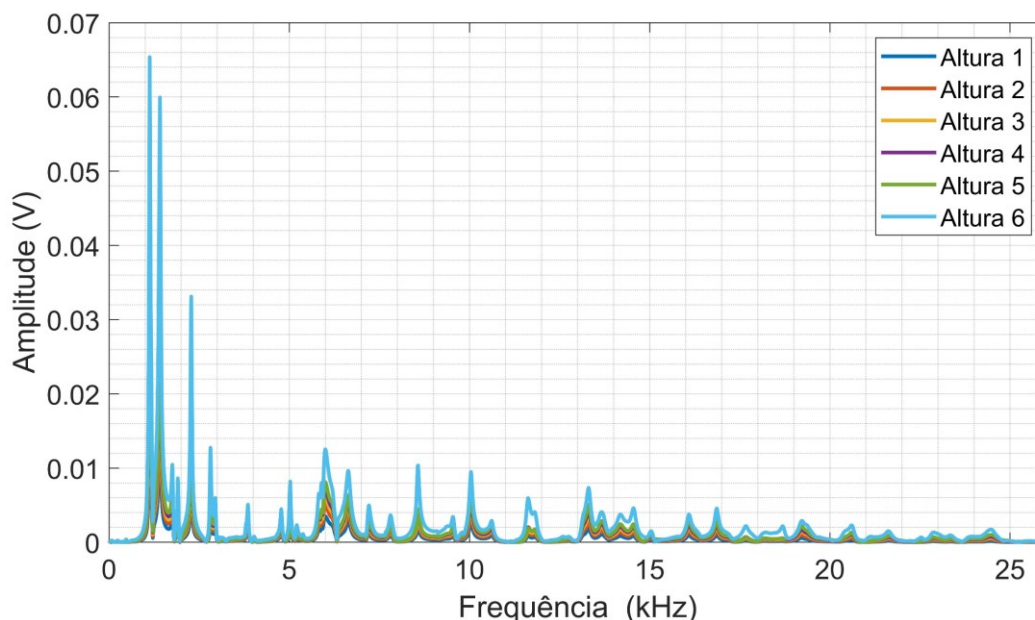


Figura 15 – Espectro de frequência em CFRP

Quando analisado uma faixa de frequência específica de 12 kHz a 17 kHz, como ilustrado na Figura 16, é possível observar com mais detalhes os picos de amplitude do sinal, e identificar que em todas as seis alturas o sinal mantém um comportamento semelhante, variando apenas a amplitude que aumenta de maneira proporcional ao aumento da altura de lançamento. Este fato, que se apresenta como característica particular do método de lançamento de esferas metálicas, é averso ao relatado por (Andreades *et al.*, 2018) que descreve o CFRP como um material não linear, que normalmente gera harmônicas quando submetido a propagação de ondas elásticas. Tal fato relatado pelo autor, é devido as ondas propagadas serem responsáveis por forçar a oscilação ou fricção das microfissuras internas presentes no material gerando efeitos elásticos não lineares.

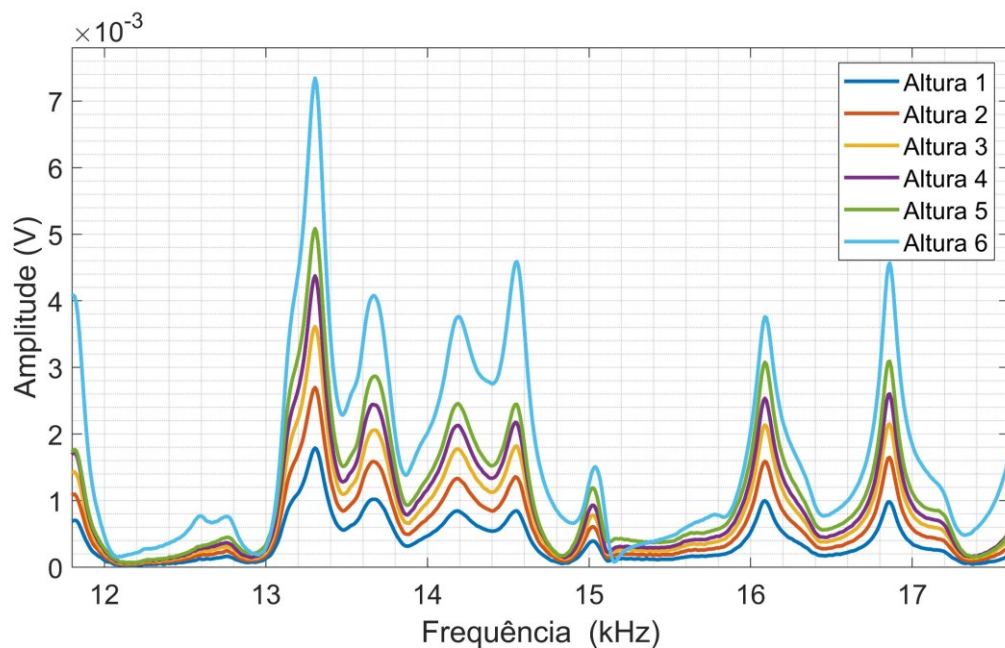


Figura 16 – Banda de frequência em CFRP de 12 a 17 kHz

A banda de frequência apresentada acima foi escolhida após analisar outras bandas ao longo de toda a atividade espectral obtida com o cálculo da FFT. As Figuras de 17 a 22 apresentam as bandas de frequência analisadas. O comportamento do sinal é similar ao longo do espectro até 25 kHz, e a partir deste ponto é possível observar uma atenuação acentuada da amplitude, como mostra a Figura 23.

A análise das bandas de frequência selecionadas ao longo da atividade espectral, culminou na escolha da banda entre 12 kHz e 17 kHz como banda representativa de todo o espectro, pelo fato neste trecho o sinal apresentar todas as características obtidas ao longo de todo o espectro de frequência, isto é, esta faixa mostra um aumento acentuado nas amplitudes à medida que a altura de lançamento aumenta.

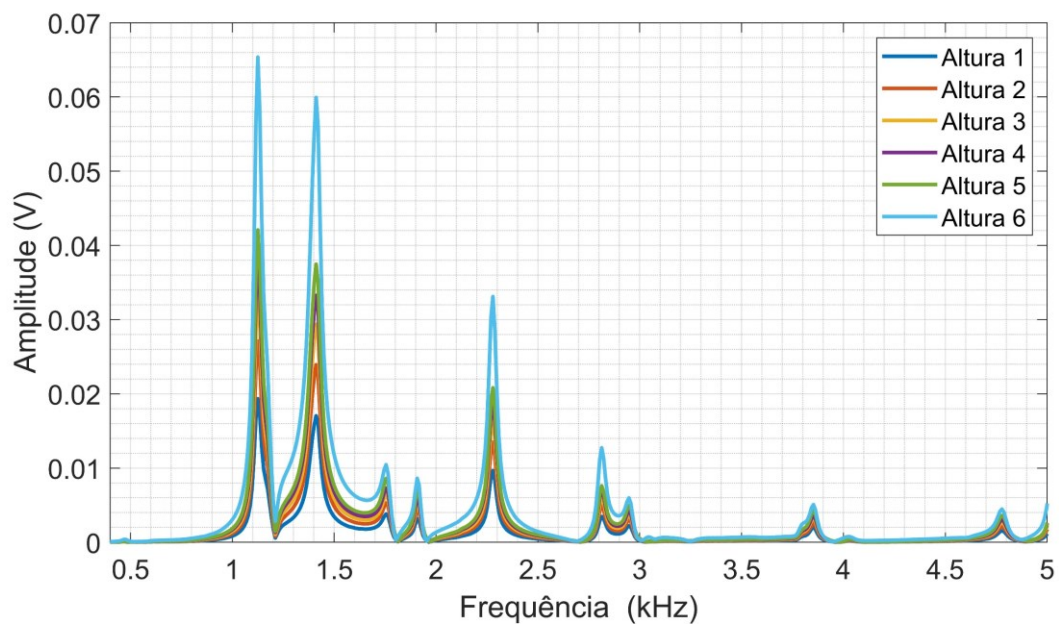


Figura 17 – Banda de frequência de 0 a 5 kHz

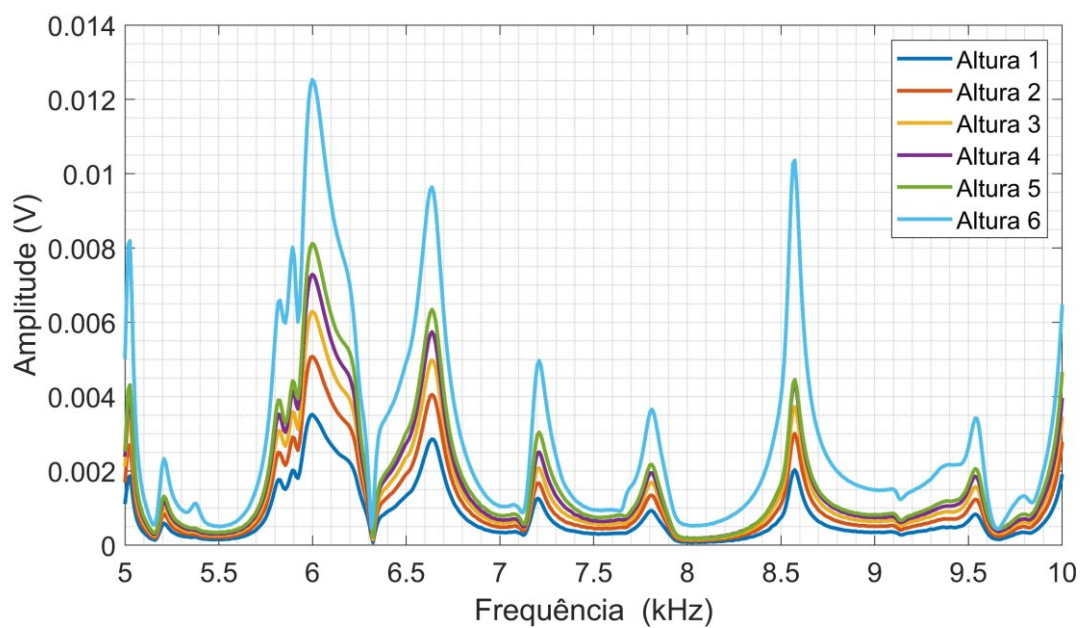


Figura 18 – Banda de frequência de 5 a 10 kHz

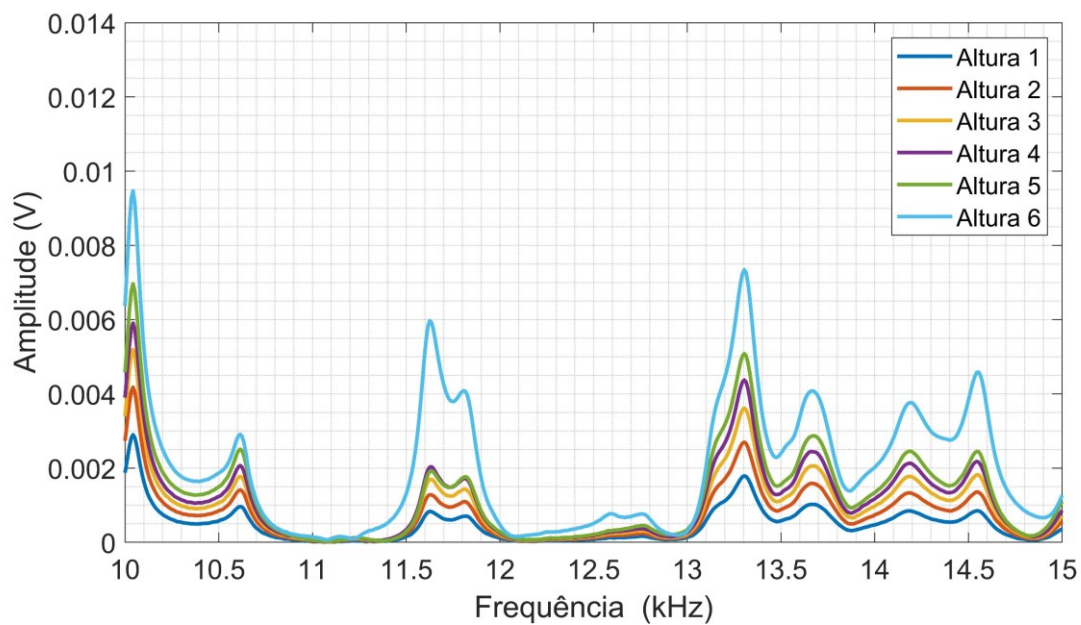


Figura 19 – Banda de frequência de 10 a 15 kHz

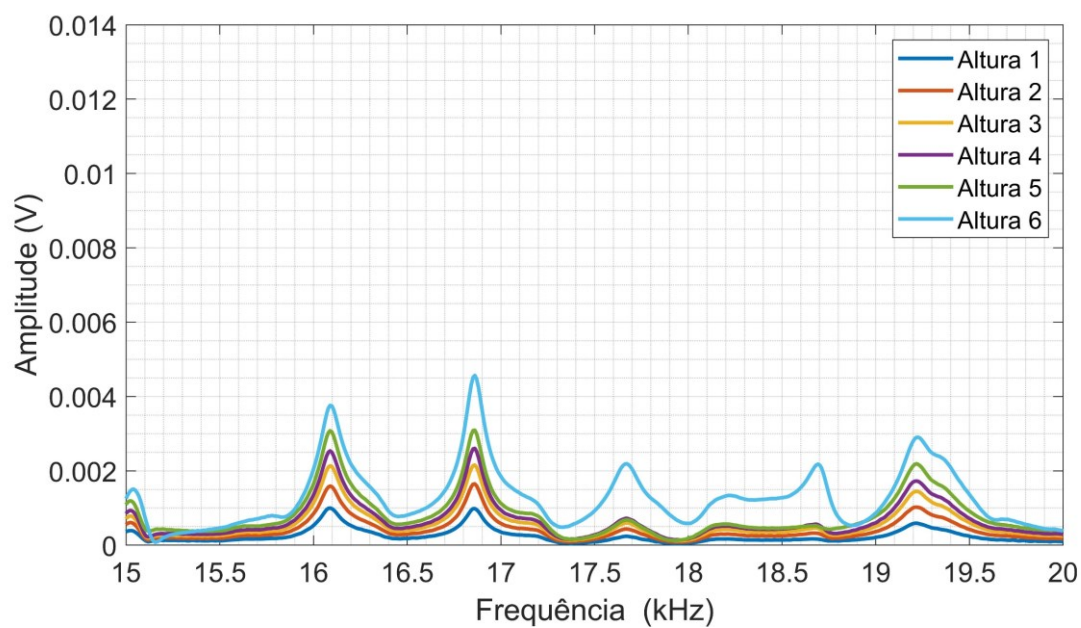


Figura 20 – Banda de frequência de 15 a 20 kHz

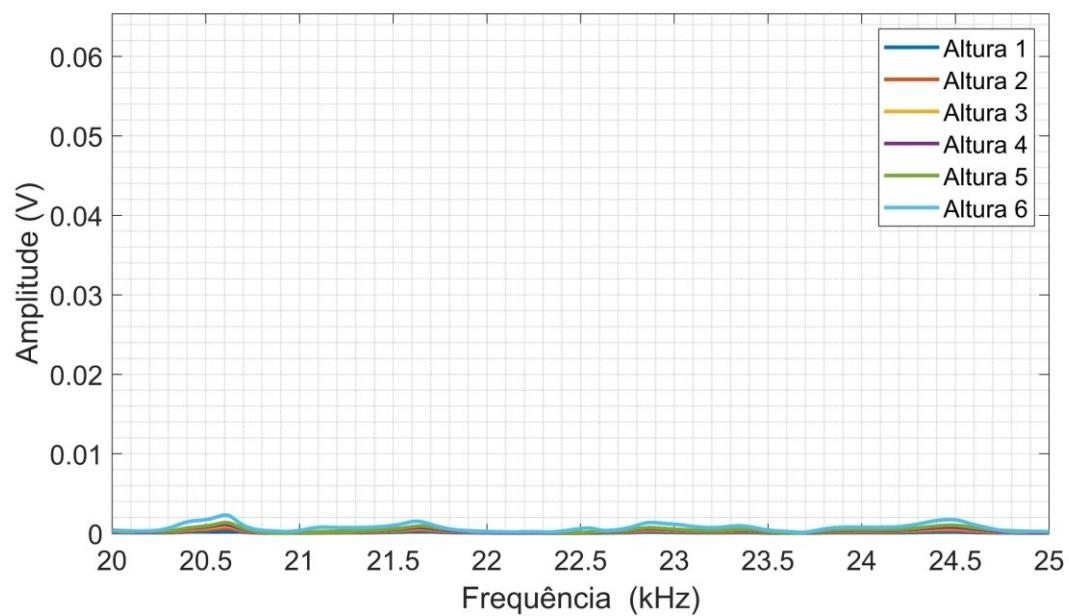


Figura 21 – Banda de frequência de 20 a 25 kHz

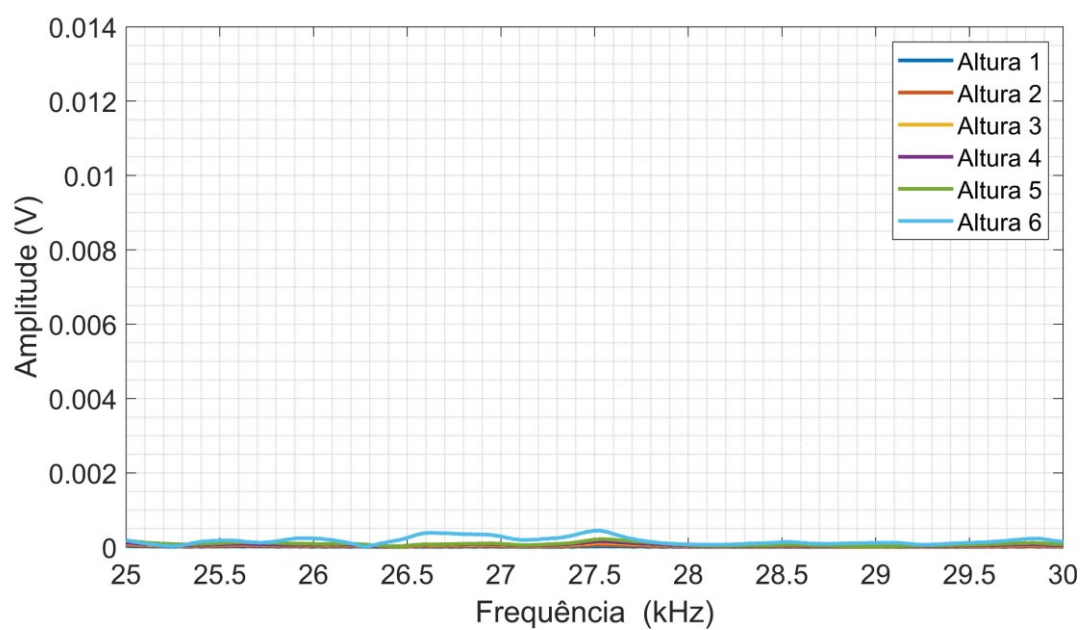


Figura 22 – Banda de frequência de 25 a 30 kHz

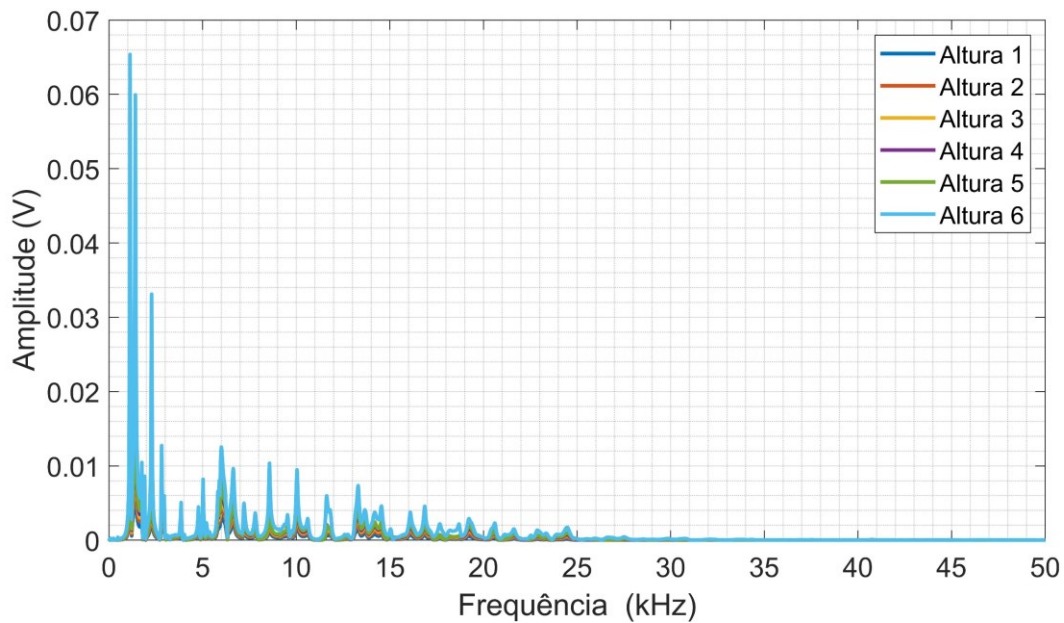


Figura 23 – Espectro de frequência de 0 a 50 kHz

O RMS foi calculado para efeitos comparativos, e pode ser observado detalhadamente na Figura 24.

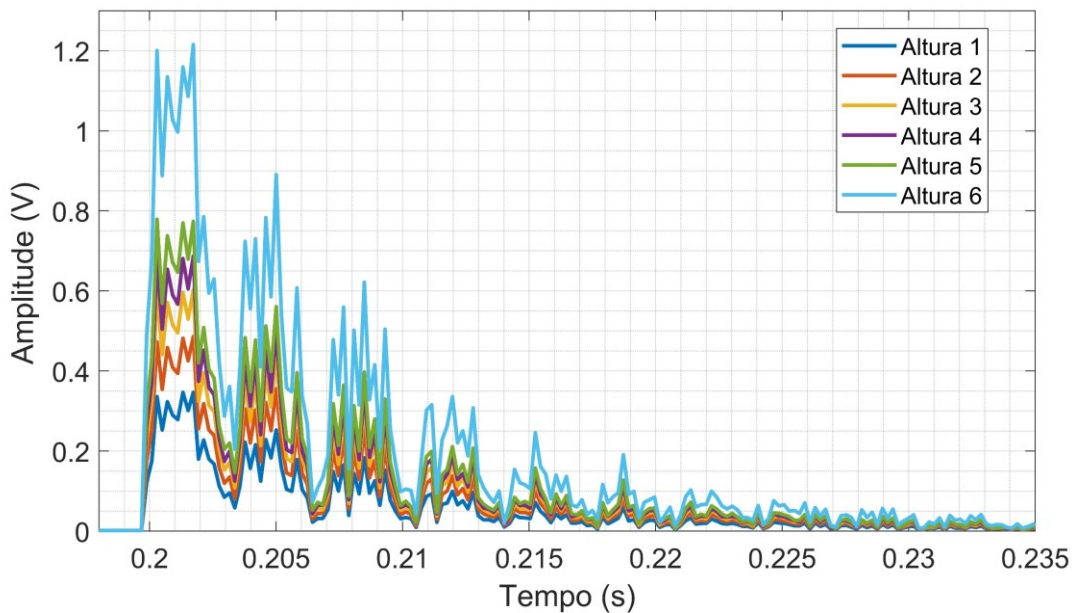


Figura 24 – Sinal RMS

Ao analisar o sinal RMS é possível observar que a amplitude é maior em maiores alturas de lançamento, evidenciando que o valor eficaz é diretamente proporcional à altura de lançamento. O comportamento apresentado é semelhante a forma de onda obtida com o cálculo da FFT, onde o sinal de menor amplitude é representado pela menor altura de lançamento e a maior amplitude representada é referente ao sinal obtido nos testes com a maior altura de lançamento. Vale ressaltar que tal comportamento também pode ser observado ao analisar o sinal bruto no domínio do tempo. A Figura 25 ilustra o sinal bruto no domínio do tempo. Este

sinal foi segmentado de modo a extrair apenas o primeiro contato da esfera com a superfície da placa de CFRP.

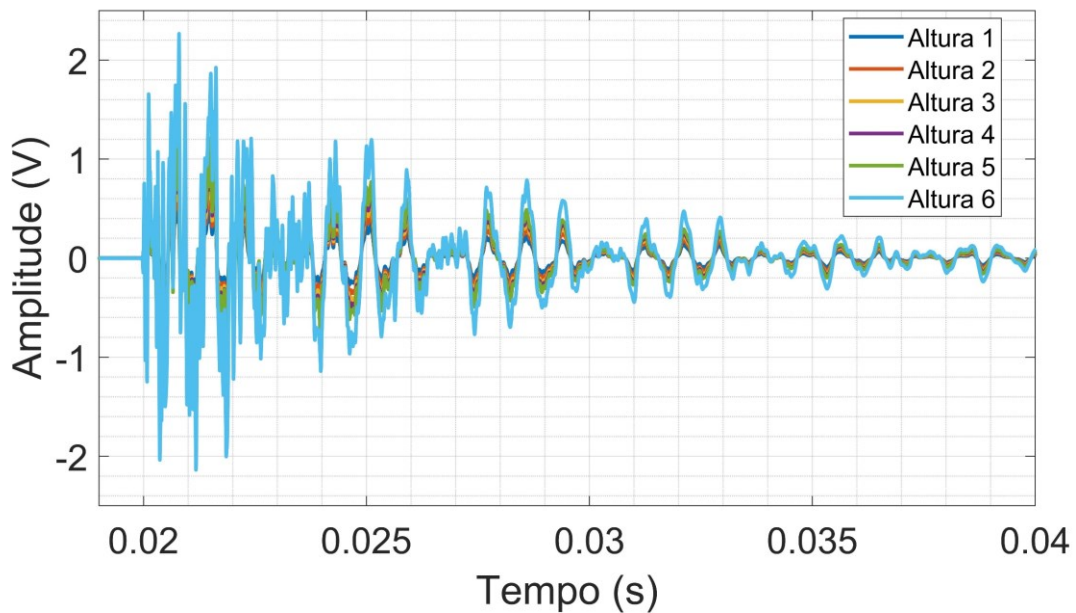


Figura 25 – Sinal bruto no domínio do tempo

Ao analisar o sinal no domínio do tempo, é possível observar que as amplitudes aumentam à medida que a altura de lançamento aumenta, indicando uma maior dissipação de energia em alturas maiores.

4.1.3 Resultados comparativos entre o método de lançamento de esfera metálica e o método PLB

Para quantificar a similaridade entre o lançamento de esfera e o método PLB foi aplicado o MSC de modo a comparar os sinais obtidos no lançamento de esfera e PLB feitos nas posições 1 e 2. A Figura 26 mostra ambas as comparações sobrepostas.

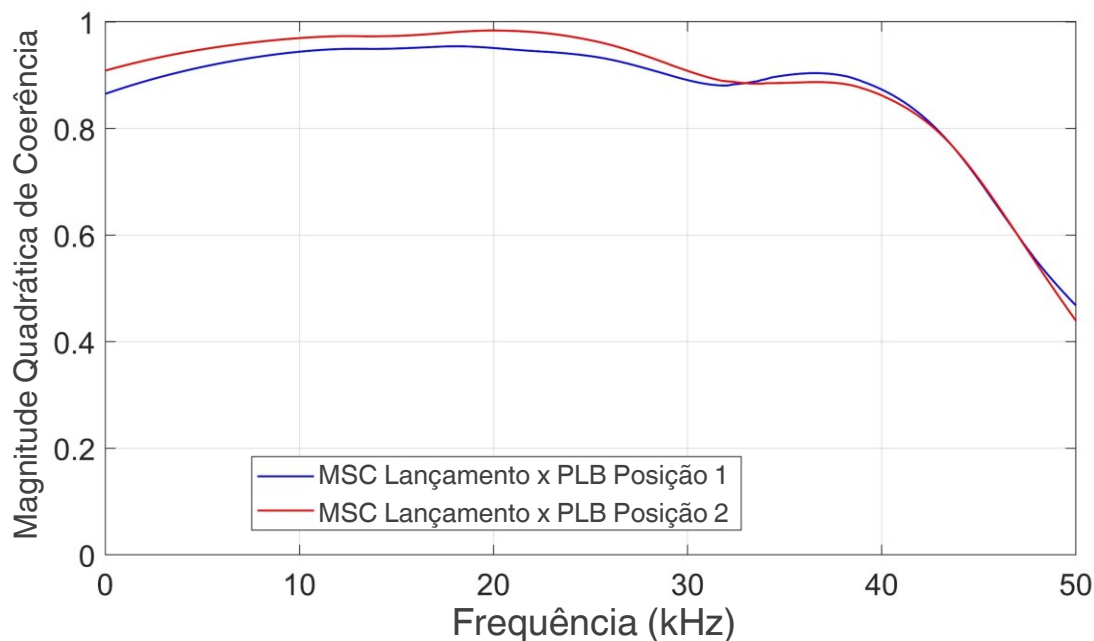


Figura 26 – MSC sobrepostos

Ao analisar a Figura 26 fica evidente a alta similaridade dos testes propostos. É possível observar índices superiores a 0,8 em ambas as comparações até aproximadamente 40 kHz, onde os índices começam a decair. Vale ressaltar que a similaridade é maior quando o teste de lançamento de esfera e PLB são efetuados no mesmo ponto da superfície do CFRP, onde os índices de mantem acima de 0,9 até 25 kHz.

A Figura 27 mostra os espectros de frequência do lançamento de esfera e PLB na posição 1 e na posição 2 em base logarítmica. Através da análise desta figura, é possível observar os pontos onde a coerência tende a diminuir.

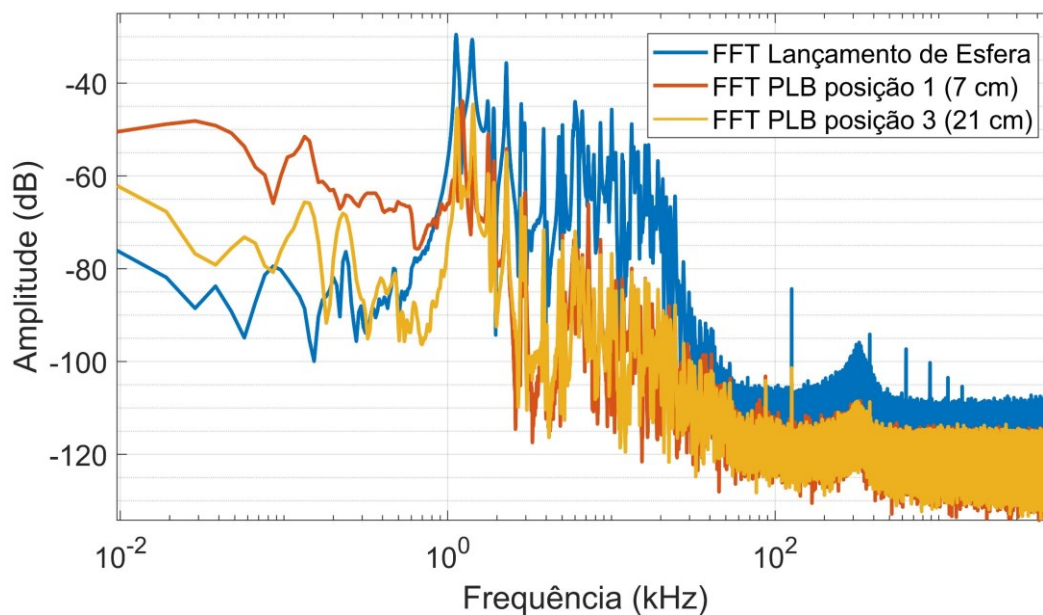


Figura 27 – Espectros de frequência em base logarítmica

4.2 Resultados obtidos com os testes realizados na estrutura de alumínio

Nesta seção são apresentados todos os resultados e discussões provenientes dos ensaios comparativos realizados na estrutura de alumínio.

4.2.1 Resultados utilizando o método PLB

Precedendo os ensaios descritos acima, três testes de PLB foram realizados no mesmo ponto em que os arremessos seriam efetuados. A Figura 28 e a Figura 29 mostram a atividade espectral dos testes de PLB.

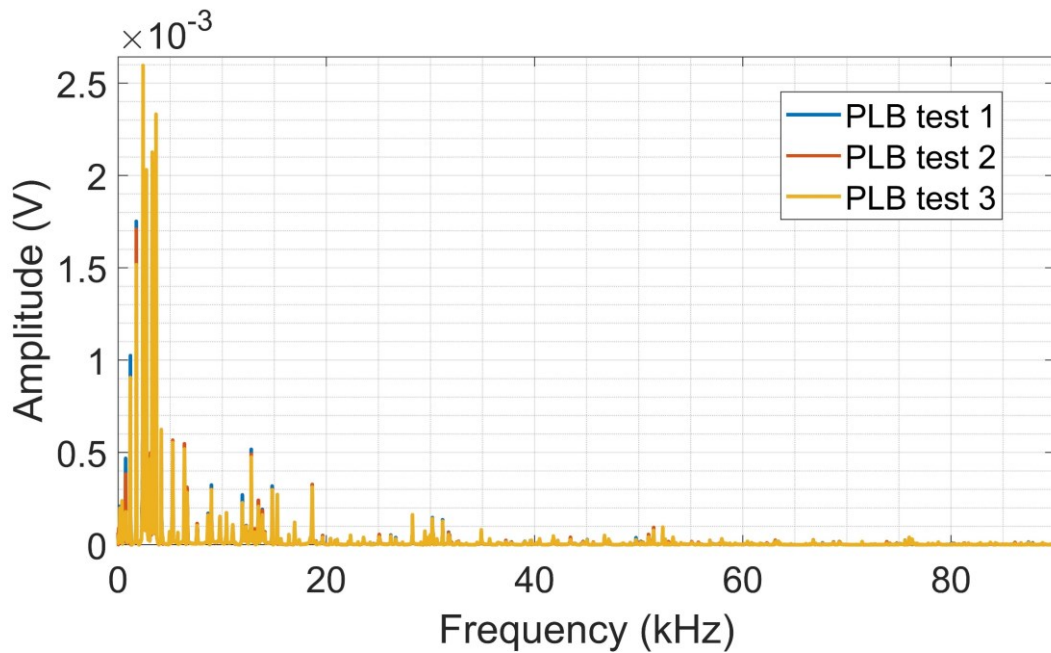


Figura 28 – Espectro de frequência do PLB no alumínio

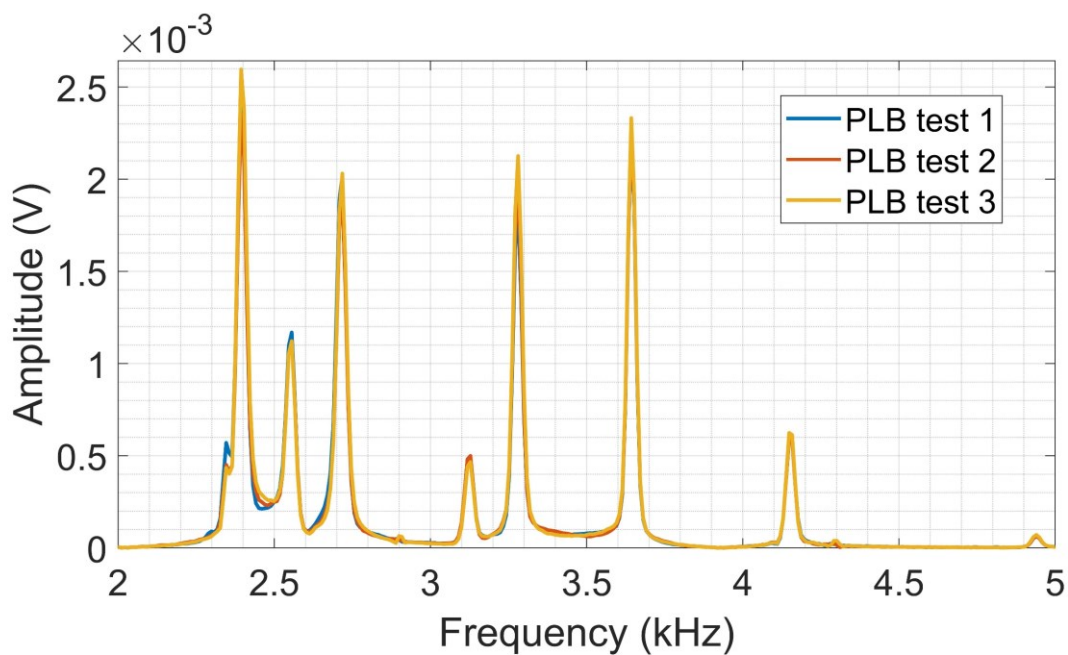


Figura 29 - Espectro de frequência do PLB no alumínio de 2 kHz a 5 kHz

É possível notar uma resposta em frequência mais ampla para os testes no alumínio quando comparado com o CFRP, porém com amplitudes menores. A densidade do alumínio é maior do que a do CFRP e, portanto, os deslocamentos fora do plano de modo flexural são menores na superfície, devido ao fato de essas ondas serem dispersivas com velocidades que variam com a frequência, resultando em menores amplitudes. Vale ressaltar que os testes de PLB foram conduzidos mantendo a mesma distância do transdutor em ambos os materiais em estudo (alumínio e CFRP), permitindo assim uma comparação da propagação das ondas acústicas nestes materiais.

Com a análise das figuras acima fica claro que o comportamento do espectro obtido através do primeiro teste se assemelha muito aos obtidos através dos outros dois testes efetuados, evidenciando a qualidade da repetibilidade dos testes.

A Figura 30 apresenta o MSC calculado para todos os pares possíveis de ser comparados para os testes de PLB realizados.

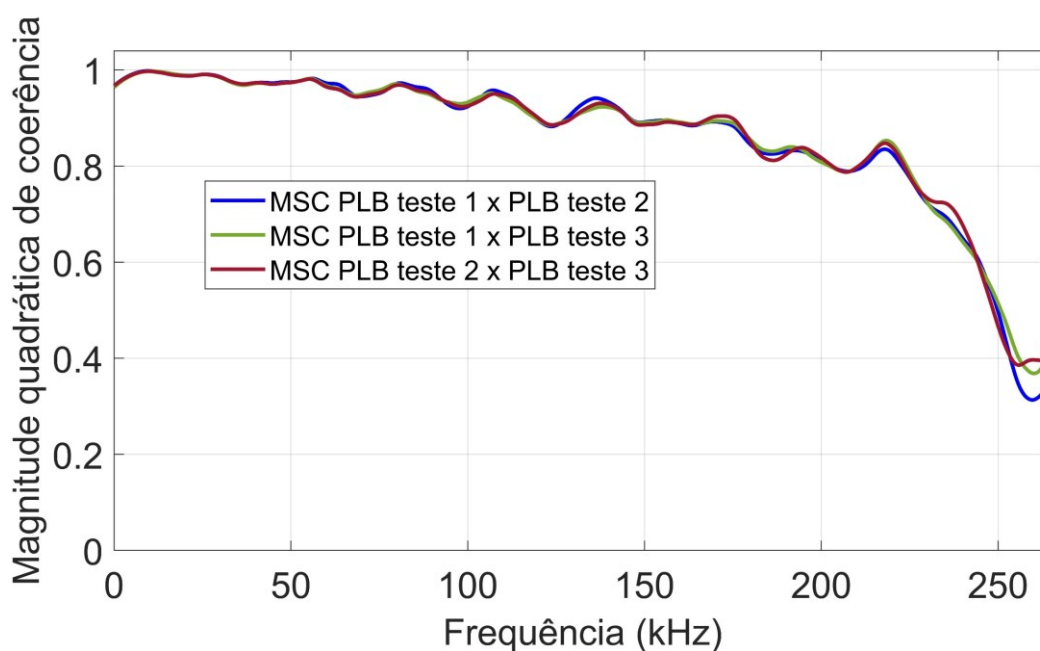


Figura 30 – MSC para os ensaios de PLB no alumínio.

O MSC indica que os testes possuem alta fidelidade de reprodução, com coerências acima de 80% na faixa de frequência compreendida de 0 a 200 kHz.

4.2.2 Resultados utilizando o método de lançamento de esfera metálica

A Figura 31 e a Figura 32 mostram o espectro de frequência dos lançamentos de esfera em duas faixas de frequência distintas.

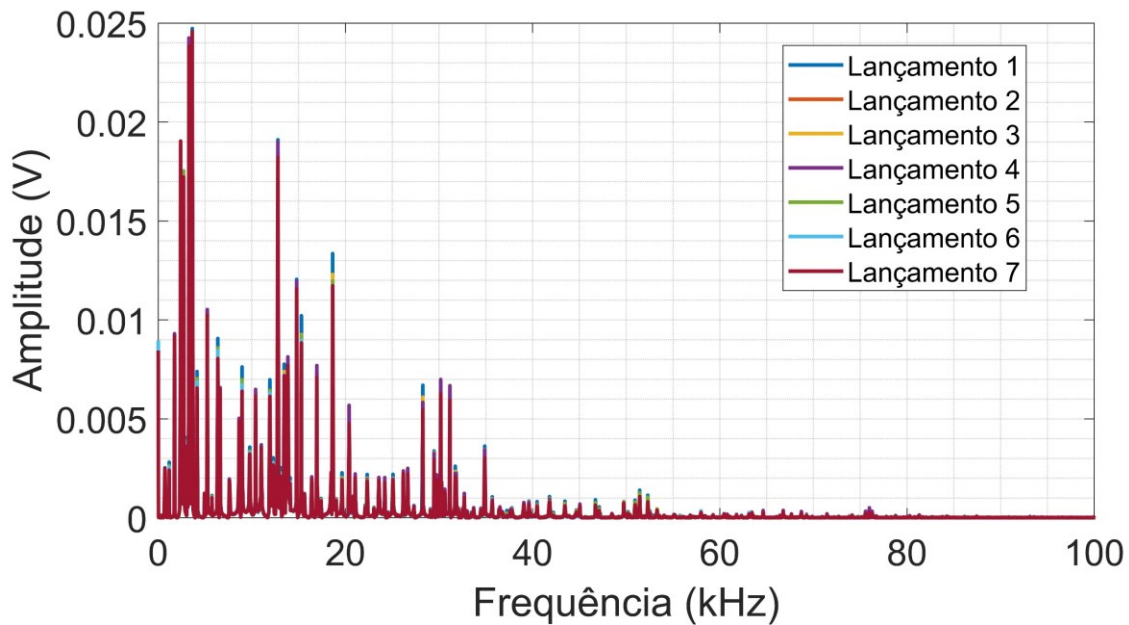


Figura 31 - Espectro de frequência do lançamento de esfera em alumínio de 0 a 100 kHz

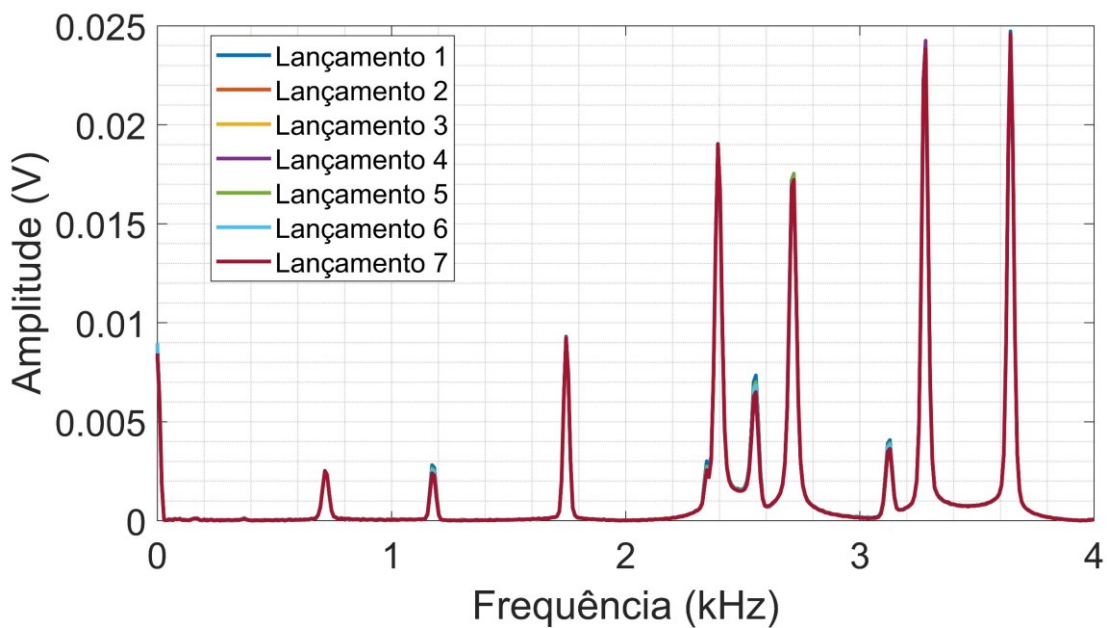


Figura 32 - Espectro de frequência do lançamento de esfera em alumínio de 0 a 4 kHz.

É possível observar que o conteúdo em frequência dos ensaios são altamente coincidentes e apresentam uma variação de amplitude quase nula. Esta análise sugere que os danos causados quando a esfera toca a superfície do alumínio são insignificantes e não interferem no conteúdo espectral dos sinais. Vale a pena que ressaltar que, assim como nos testes de PLB, é possível observar que o espectro de frequência obtido apresenta uma banda de frequência mais ampla e com amplitudes menos quando comparado com os sinais obtidos para os testes conduzidos no CFRP.

O cálculo do coeficiente de correlação foi efetuado comparando o primeiro lançamento efetuado com o último, e com outras duas condições intermediárias da placa. Os valores de correlação obtidos estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficiente de correlação dos lançamentos em alumínio.

	Coeficiente de correlação
Lançamento 1 e lançamento 3	0,9945
Lançamento 1 e lançamento 5	0,9968
Lançamento 1 e lançamento 7	0,9914

Os resultados expressos na tabela acima indicam que os danos também são insignificantes quando os sinais são analisados no domínio do tempo. Os índices de correlação entre o primeiro e o último ensaio é superior a 99%, o que comprova que a melhor condição da superfície do alumínio e a condição mais danificada apresentam sinais de emissão acústica quase idênticos.

O MSC para três pares de lançamento foi calculado, de modo a constatar se houve ou não variação no conteúdo espectral dos sinais devido ao dano causado pelo toque da esfera na superfície do alumínio. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 33.

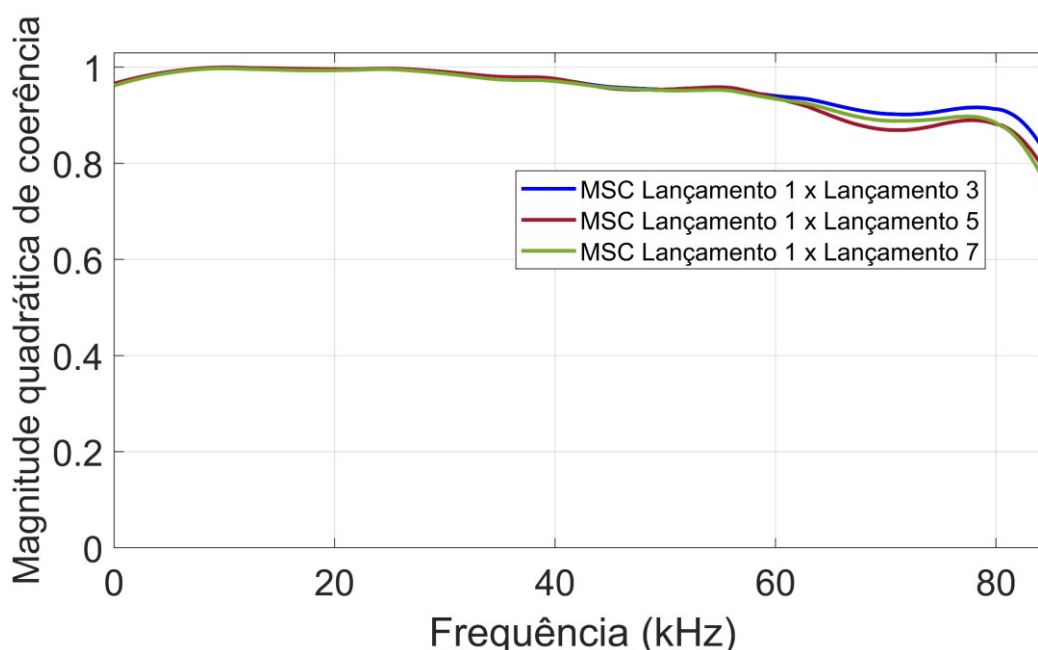


Figura 33 – MSC Lançamento de esfera em alumínio

Com a análise do MSC, fica evidente a alta coerência entre 10 kHz e 30 kHz, onde o índice é próximo de 1, porém por toda a banda de frequência do sinal os índices são superiores

a 0,8 evidenciando através do MSC a alta coerência e semelhança dos sinais apesar de constatado os danos no material com os arremessos.

4.2.3 Resultados comparativos entre o método de lançamento de esfera metálica e o método PLB

A Figura 34 apresenta o cálculo do MSC para os testes de lançamento de esfera sobrepostos o com os testes PLB.

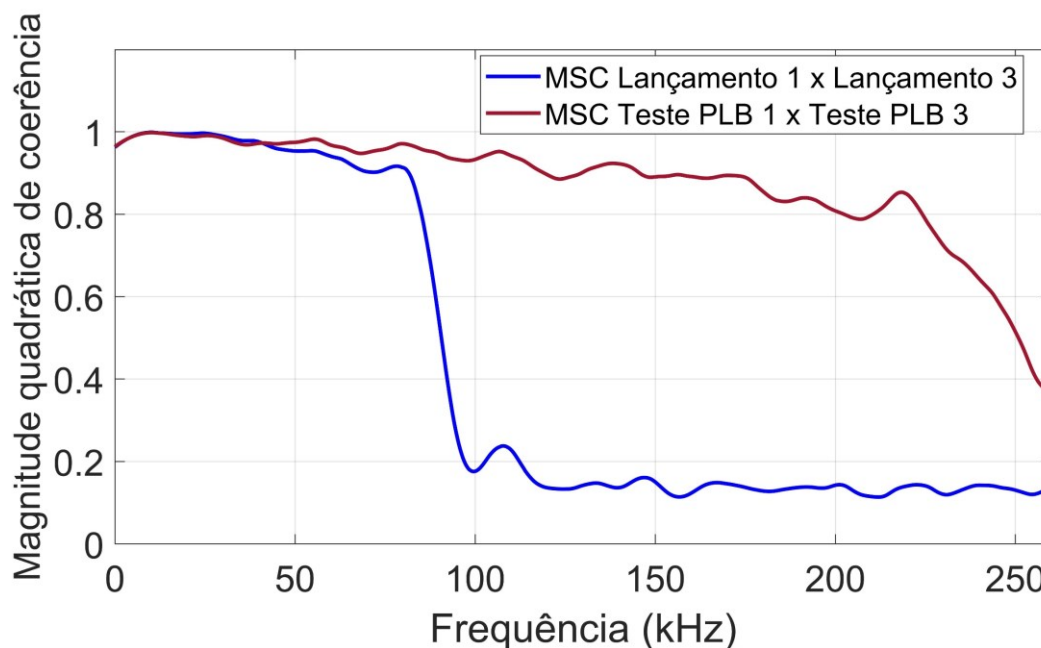


Figura 34 – MSC do lançamento de esfera e PLB no alumínio

É possível observar que o MSC para os testes de PLB mantém altos índices mesmo em frequências superiores a 100 kHz, enquanto o MSC para o lançamento de esfera apresenta uma quebra abrupta de índices a partir de 80 kHz. Isto se dá pelo fato de o PLB gerar um impulso de menor duração, o que incita em respostas espectrais com frequências mais altas, enquanto o lançamento de esfera, apesar de fornecer amplitudes maiores e mais bem definidas, apresenta uma resposta melhor em frequências menores.

4.3 Resultados dos ensaios de monitoramento de integridade estrutural

A Figura 35 e a Figura 36 apresentam o cálculo da FFT obtida com a adição gradativa de massa sobre as placas de CFRP e alumínio respectivamente.

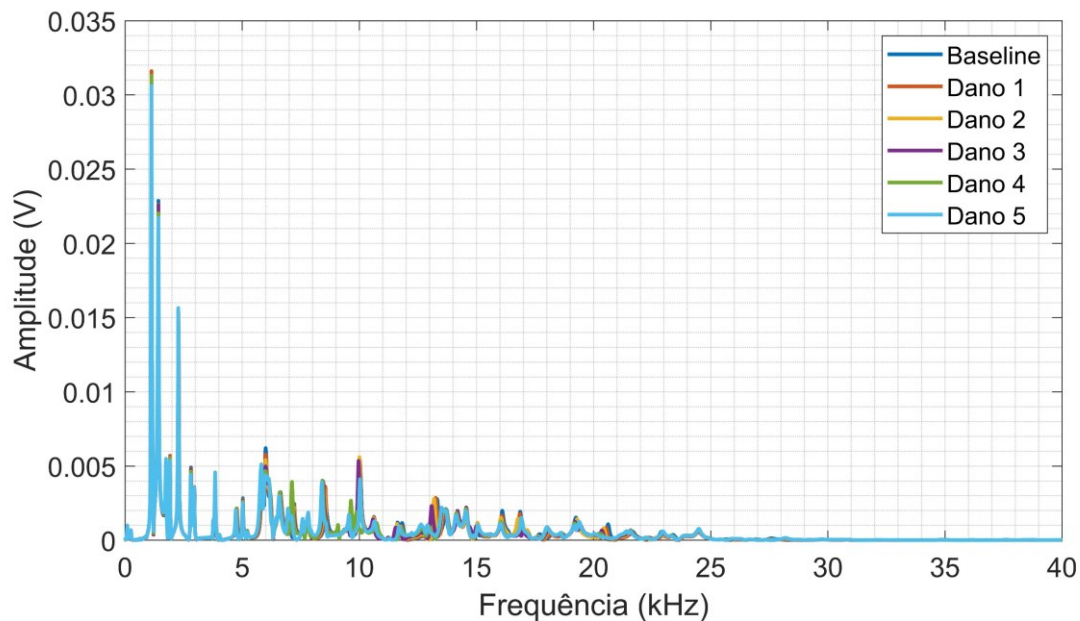


Figura 35 - Espectro de frequência dos testes com simulação de danos em CFRP

Através da análise visual do espectro obtido para o CFRP, é possível constatar que a maior parte da atividade espectral ocorre em baixas frequências, até aproximadamente 35 kHz. Isto se dá pelas características atenuadoras encontradas no CFRP. É possível observar também um comportamento diferente para cada uma das condições da peça, indicando que o diafragma piezelétrico fixado sobre a placa de CFRP é sensível a variação de massa da placa. A faixa de frequência compreendida entre 8 kHz e 16 kHz foi escolhida após uma análise ao longo de todo sinal transiente e exibe claramente este comportamento, constatado pelo descolamento entre as diferentes amostras conforme ilustrado na Figura 36.

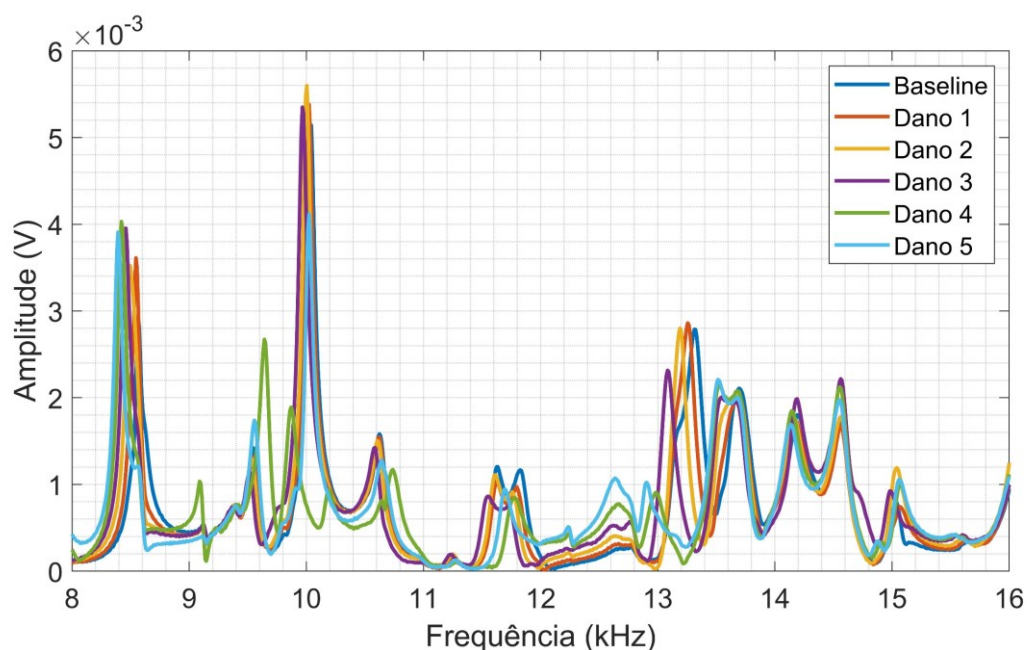


Figura 36 – Faixa de frequência representativa para ensaios em CFRP

Esta faixa de frequência mostra claramente uma variação dos sinais obtidos devido à variação da massa da placa de CFRP. Além de ser constatada a variação de amplitude, também é possível observar uma defasagem na frequência entre os testes realizados com a placa em condições diferentes de massa.

Vale ressaltar que a faixa de frequência apresentada acima foi escolhida pelo autor pelo fato de julgarem a mesma como a faixa de frequência que melhor representa a condição do sinal obtido em relação a variação da massa da placa. Outras faixas de frequência ao longo de todo espectro apresentam o mesmo comportamento observado acima, porém com uma menor defasagem e amplitude.

Posteriormente, métricas que foram aplicadas nestes sinais serão apresentadas graficamente juntamente com sua análise.

Os ensaios realizados na placa de alumínio foram submetidos ao mesmo tipo de análise e processamento digital de sinais. Os espectros de frequência obtidos estão ilustrados na Figura 37.

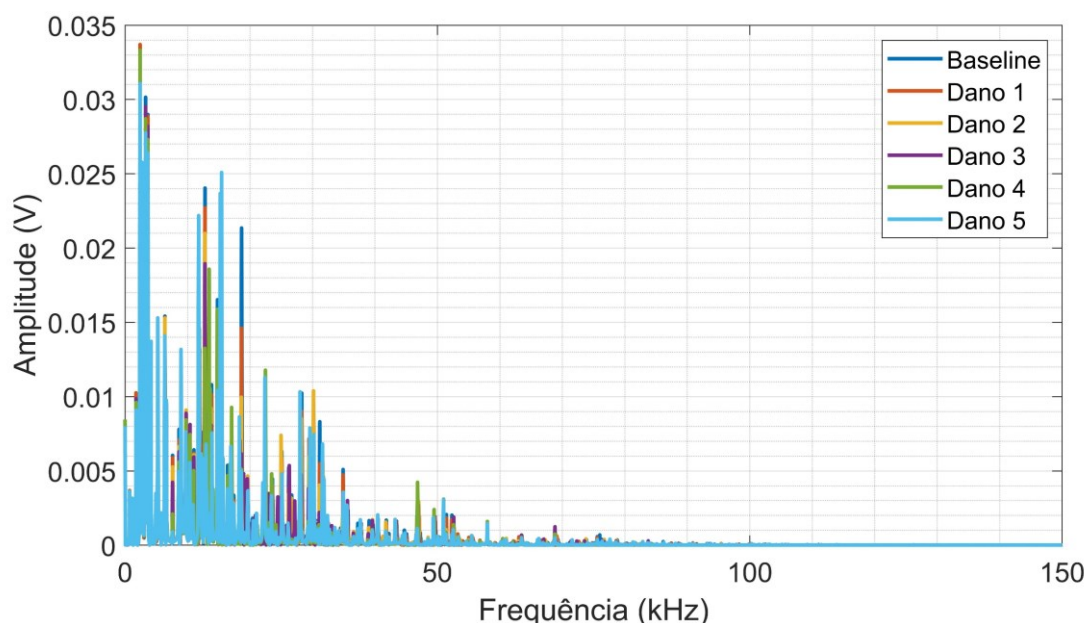


Figura 37 - Espectro de frequência dos testes com simulação de danos em Alumínio

O comportamento observado no alumínio muito se assemelha ao encontrado no CFRP, porém as faixas de frequência encontradas no alumínio são muito mais amplas, chegando a aproximadamente 150 kHz. A variação de amplitude e defasagem em frequência dos sinais em relação a massa da placa de alumínio é significativa, evidenciando a aplicabilidade do método proposto para placas de alumínio e sua sensibilidade a variação de massa. Após a análise de todo o sinal transiente, foi possível selecionar a banda de frequência compreendida entre 8 kHz

e 16 kHz como a banda de frequência que melhor representa as variações causadas nos sinais em decorrência das variações de massa na estrutura. Esta banda de frequência pode ser observada com mais detalhes na Figura 38.

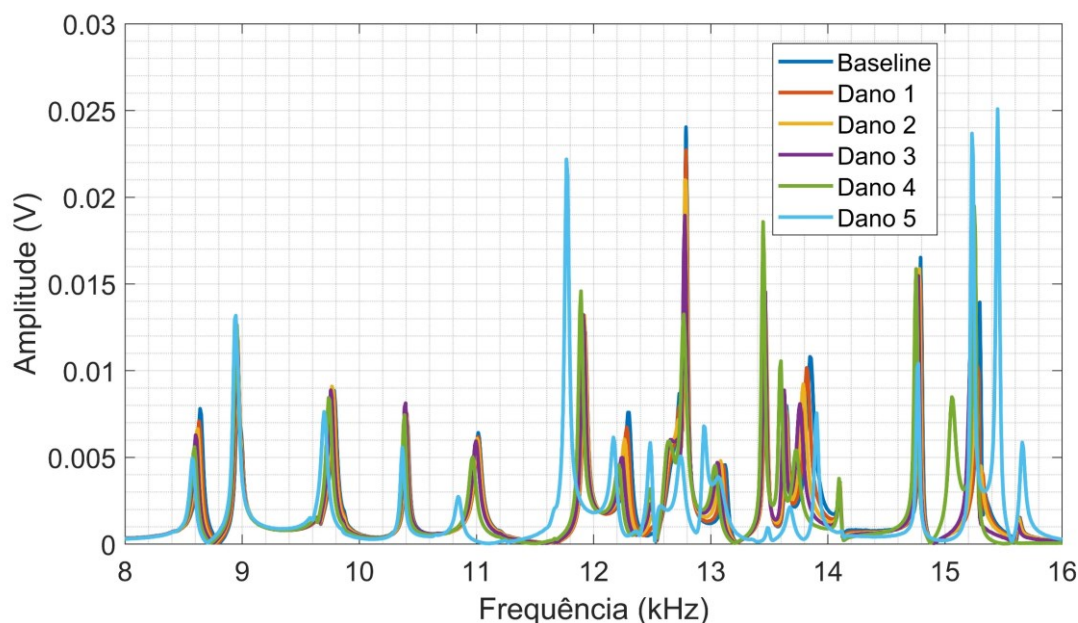


Figura 38 - Faixa de frequência representativa para ensaios em alumínio

Ao analisar a imagem acima, é possível ver a variação de amplitude e defasagem da frequência entre um teste e outro. A banda de frequência de 8 kHz a 16 kHz foi escolhida pelo autor pelo fato de mostrar com clareza todas as diferenças entre os testes. O fato de ser a mesma faixa de frequência escolhida para o CFRP evidencia que a mesma banda é suficiente para expor a relação entre a variação dos sinais e a alteração da massa da placa em estudo.

Métricas o RMSD e o CCDM foram aplicadas nos sinais analisados, tendo em vista quantificar as variações de amplitude e defasagens observadas com a análise dos espectros em ambas as placas.

O CCDM aplicado nos sinais obtidos no CFRP podem ser observados na Figura 39 e na Figura 40.

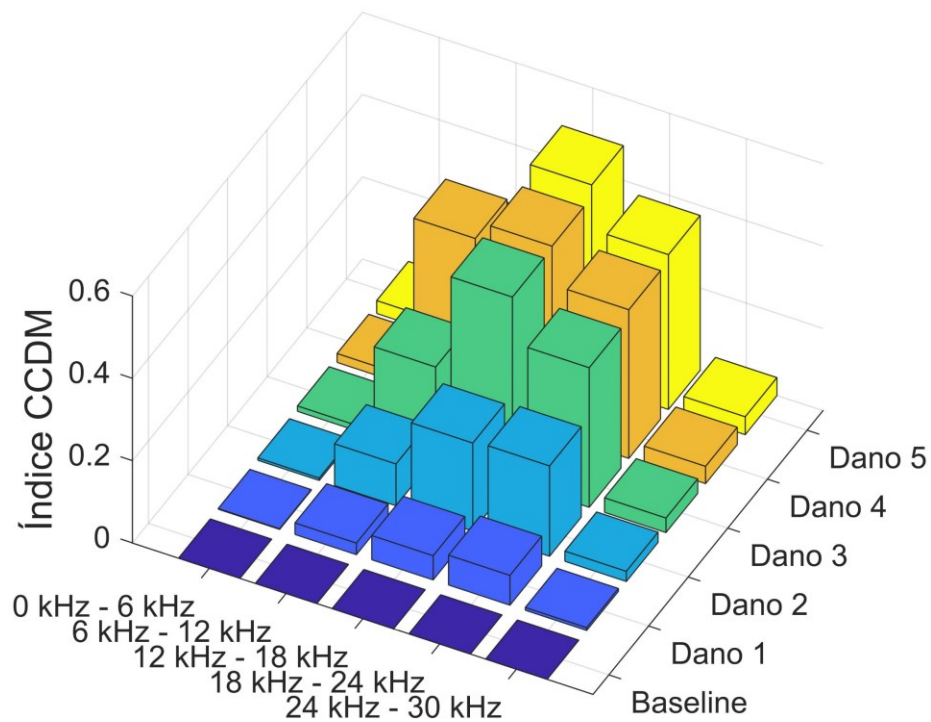


Figura 39 – Índice CCDDM aplicado em CFRP

A Figura 39 mostra o índice CCDDM em todas as condições da placa de CFRP divididos em janelas de frequência de 6 kHz. É possível observar que em quase todas as bandas de frequência ilustradas acima o índice aumenta à medida que os danos são adicionados à superfície da placa, ou seja, o aumento da massa da placa de CFRP causa um deslocamento ou defasagem da frequência onde ocorrem os picos de amplitude, aumentando gradativamente com a adição de massa.

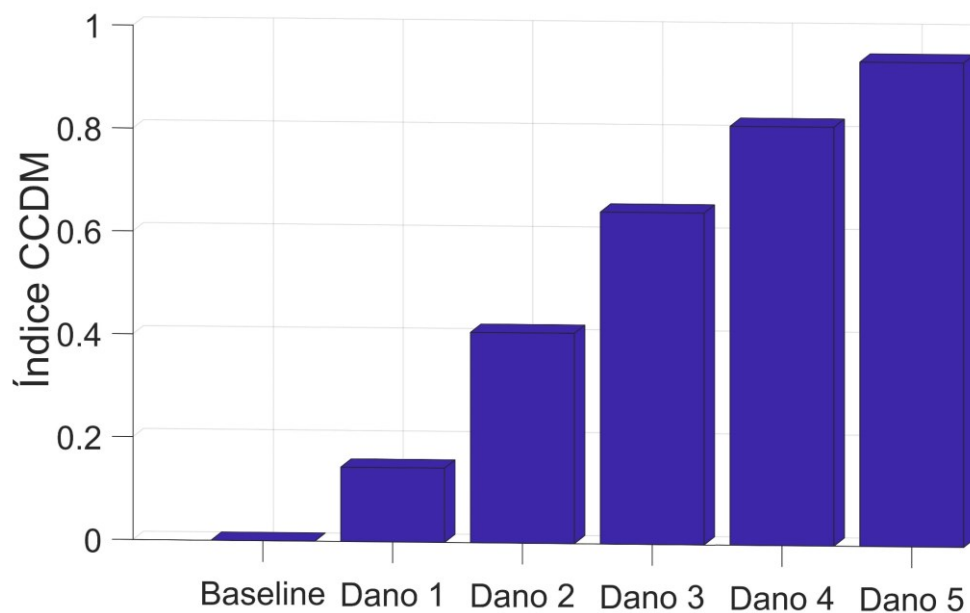


Figura 40 – Índice CCDDM aplicado em CFRP na faixa de frequência de 8 kHz à 16 kHz

A imagem acima aponta o aumento do índice CCDM aplicado na banda de frequência de 8 kHz à 16 kHz escolhida anteriormente pelo autor por ser considerada a faixa de frequência que melhor ilustra o comportamento de variação dos sinais entre uma condição e outra da placa. É possível constatar que o índice CCDM aumenta expressivamente a medida em que ocorre a adição de massa sobre a placa.

A mesma métrica foi aplicada para os testes efetuados na placa de alumínio, e seus resultados são exibidos na Figura 41 e na Figura 42.

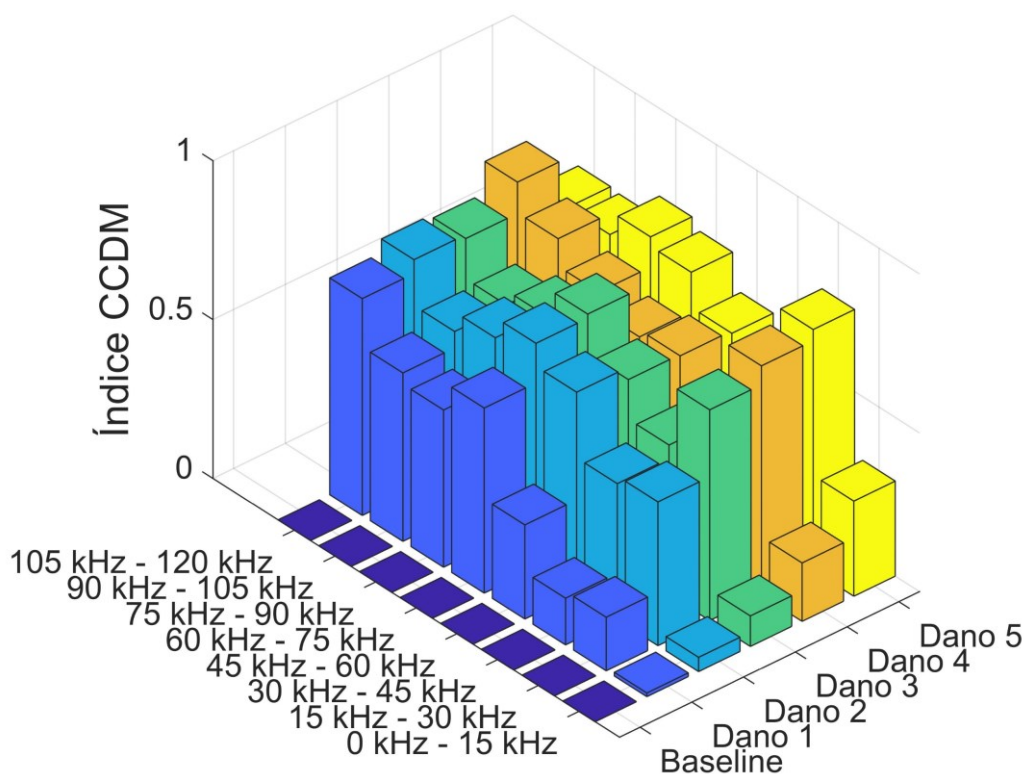


Figura 41 - Índice CCDM aplicado em alumínio

Apesar de apresentar faixas de frequências mais elevadas, os testes performados no alumínio, assim como CFRP, apresentam um comportamento muito semelhante em baixas faixas de frequência (entre 0 kHz e 30 kHz). Estas faixas de frequência ilustram com clareza, através do índice CCDM, a crescente defasagem dos sinais devido a adição de massa na placa de alumínio, constatando assim que o diafragma piezelétrico fixado em alumínio é sensível a variação de massa.

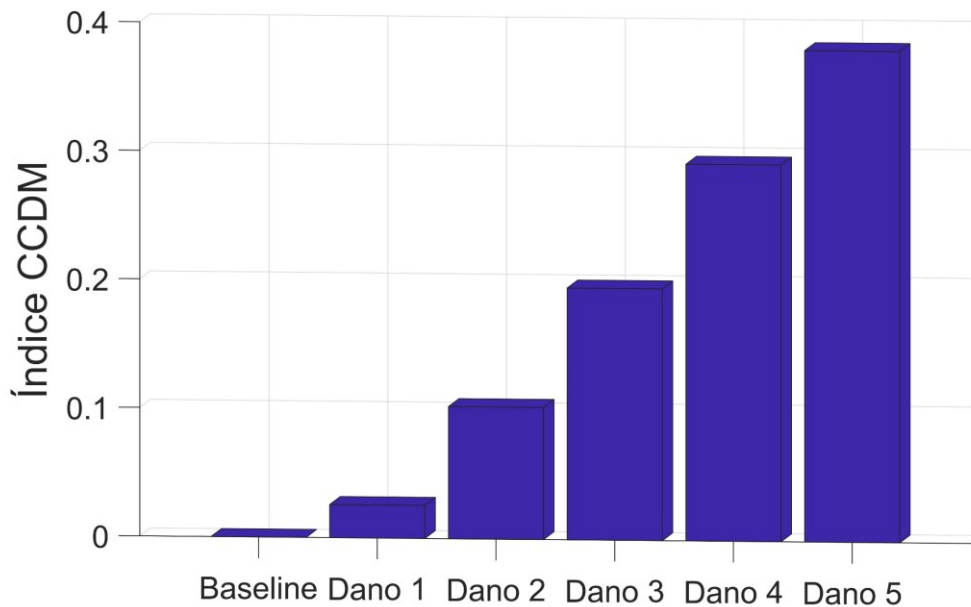


Figura 42 - Índice CCDM em alumínio na faixa de frequência de 8 kHz à 16 kHz

A Figura 42 apresenta o índice CCDM calculado na faixa de frequência compreendida entre 8 kHz e 16 kHz e, assim como nos testes performados em CFRP, é possível constatar o aumento do índice à medida que ocorre o aumento da massa do alumínio.

Como mencionado anteriormente neste capítulo, o RMSD foi calculado para fins de análise e para quantificar o quanto houve variação de amplitude entre os testes nos dois corpos de prova utilizados para estudo. O RMSD baseado nos sinais obtidos com os testes em CFRP é ilustrado na Figura 43 e na Figura 44.

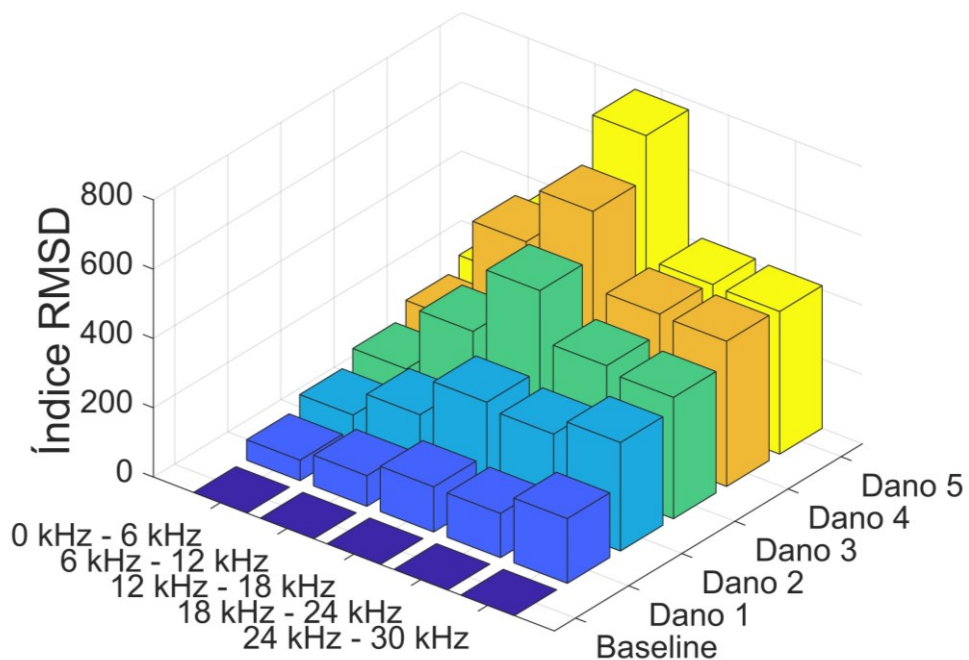


Figura 43 - Índice RMSD aplicado em CFRP

A Figura 43 mostra o RMSD baseado nos sinais obtidos através dos testes em CFRP, em uma faixa de frequência até 30 kHz divididos em cinco bandas de frequência iguais de 6 kHz. É possível constatar com a análise desta figura que o RMSD aumenta à medida que ocorre adição de massa na placa de CFRP, assim como observado anteriormente para o índice CCDM. Sendo assim, é possível afirmar que a adição de massa sobre a placa gera uma variação na amplitude dos sinais.

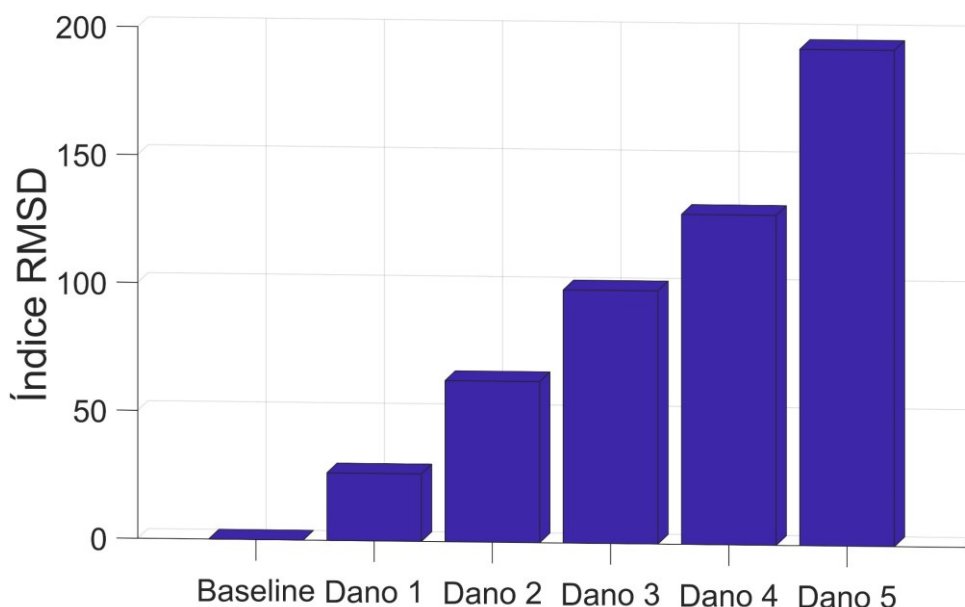


Figura 44 - Índice RMSD aplicado em CFRP na faixa de frequência de 8 kHz à 16 kHz

A Figura 44 mostra o RMSD aplicado na faixa de frequência compreendida entre 8 kHz e 16 kHz, pelo fato de ser esta a faixa de frequência escolhida como a que melhor representa a condição do sinal para os ensaios realizados neste trabalho. A imagem acima ilustra o aumento acentuado do RMSD devido à adição de massa, ou seja, a amplitude de cada um dos ensaios realizados no CFRP tende a variar de acordo com a variação de massa da placa.

A Figura 45 e a Figura 46 apresentam o RMSD calculado para os sinais obtidos através dos ensaios realizados na placa de alumínio.

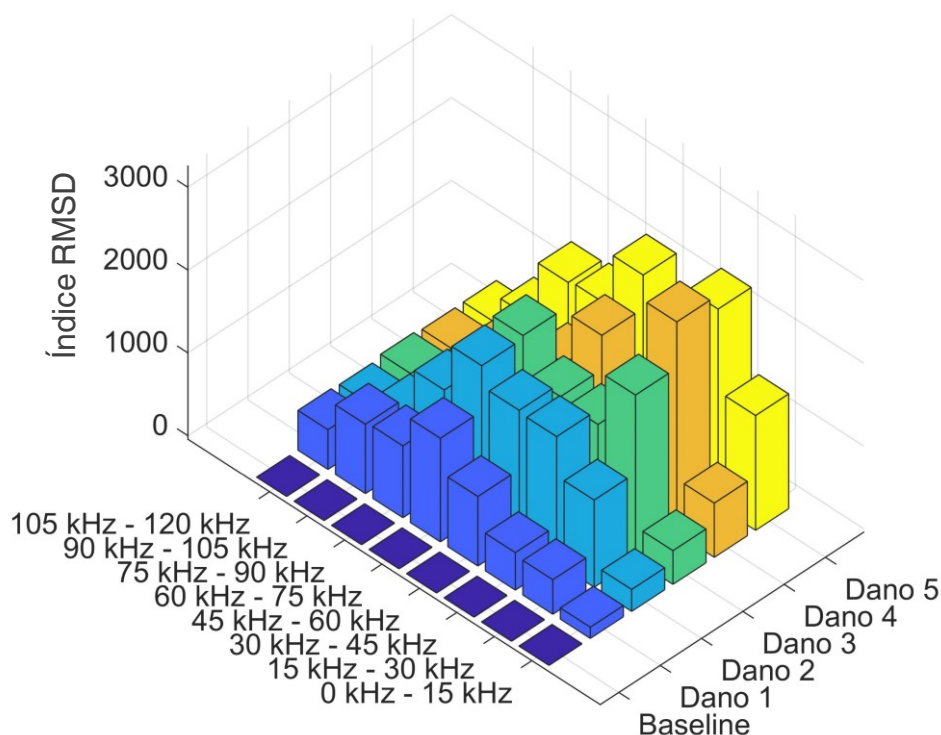


Figura 45 - Índice RMSD aplicado em Alumínio

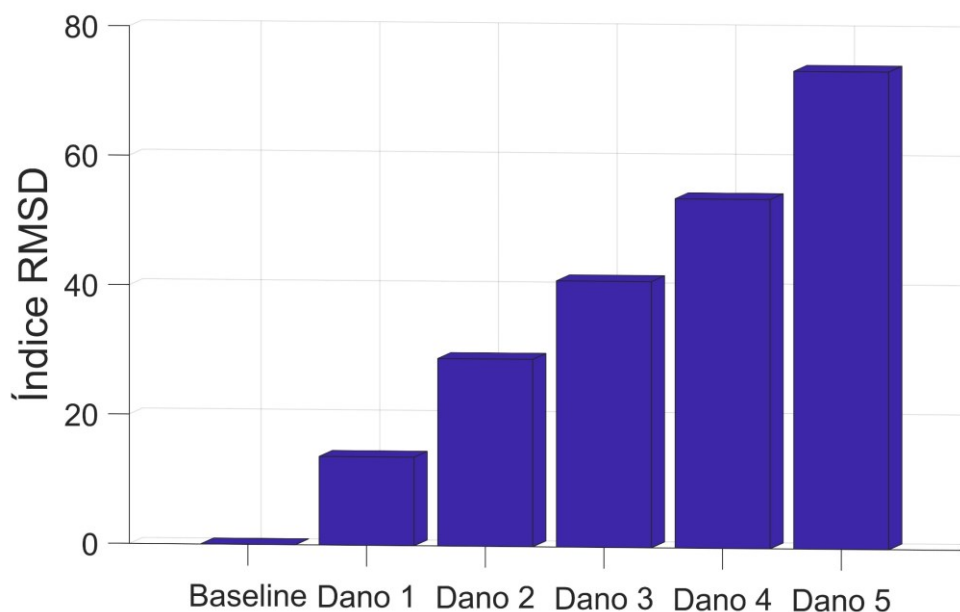


Figura 46 - Índice RMSD aplicado em alumínio na faixa de frequência de 8 kHz à 16 kHz

É possível observar na Figura 45 o RMSD aplicado em uma faixa de frequência compreendida entre 0 e 120 kHz dividida em oito pacotes iguais de 15 kHz. Em cada banda de 15 kHz é possível observar a variação do índice RMSD de acordo com a variação de massa da placa de alumínio. Nas bandas de frequência mais baixas, é possível constatar um aumento gradativo do índice de acordo com o aumento da massa da placa de alumínio, porém em faixas de frequência mais altas, nem sempre o comportamento do RMSD é crescente. Portanto, como

uma análise já feita anteriormente neste trabalho para outro índice, a Figura 46 mostra o RMSD calculado em uma banda de frequência compreendida entre 8 kHz e 16 kHz por motivos já descritos antes. O aumento gradativo do RMSD nesta faixa de frequência mostra que esta faixa representa de maneira adequada as variações de amplitude que ocorrem no sinal quando é adicionado uma massa na placa de alumínio em estudo.

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> >.

APÊNDICE A – MEDIÇÕES COMPLETAS

Tabela 6 – Medições completas

MEDIÇÕES PARA ENSAIOS DEFINITIVOS (mm)						
		MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
DIAMETRO DA ESFERA MENOR		3,9	3,9	3,9	3,90	0,0000
PLACA DE CFRP	ESPESSURA	5,5	5,5	5,4	5,47	0,0577
	COMPRIMENTO	448	448,1	447,9	448,00	0,1000
	LARGURA	106,3	106,3	106,3	106,30	0,0000
DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO	ESPESSURA TOTAL	0,3	0,3	0,3	0,30	0,0000
	ESPESSURA LATÃO	0,1	0,1	0,1	0,10	0,0000
	DIAMETRO	19,9	19,9	19,9	19,90	0,0000
DISTÂNCIA	P0 - PZT	25,5	25,7	25,4	25,53	0,1528
	PZT - P1	69,7	69,5	69,8	69,67	0,1528
	P1 - P2	70,7	70,2	70,3	70,40	0,2646
	P2 - P3	69,9	70	69,9	69,93	0,0577
	P3 - P4	70,1	70,2	70,2	70,17	0,0577
	P4 - P5	70,4	70,3	70,2	70,30	0,1000
DIÂMETRO EXTERNO PORCAS METÁLICAS	Porca 1 - CFRP	6,2	6,2	6,2	6,20	0,0000
	Porca 2 - CFRP	6,2	6,2	6,2	6,20	0,0000
	Porca 3 - CFRP	6,2	6,2	6,2	6,20	0,0000
	Porca 4 - CFRP	6,2	6,1	6,2	6,17	0,0577
	Porca 5 - CFRP	6,2	6,2	6,2	6,20	0,0000
	Porca 6 - Alumínio	6,2	6,2	6,3	6,23	0,0577
	Porca 7 - Alumínio	6,1	6,2	6,2	6,17	0,0577
	Porca 8 - Alumínio	6,2	6,1	6,2	6,17	0,0577
	Porca 9 - Alumínio	6,2	6,2	6,2	6,20	0,0000
	Porca 10 - Alumínio	6,2	6,3	6,2	6,23	0,0577
DIÂMETRO INTERNO PORCAS METÁLICAS	Porca 1 - CFRP	2,4	2,5	2,5	2,47	0,0577
	Porca 2 - CFRP	2,5	2,5	2,5	2,50	0,0000
	Porca 3 - CFRP	2,5	2,5	2,5	2,50	0,0000
	Porca 4 - CFRP	2,5	2,4	2,5	2,47	0,0577
	Porca 5 - CFRP	2,4	2,5	2,5	2,47	0,0577
	Porca 6 - Alumínio	2,4	2,5	2,5	2,47	0,0577
	Porca 7 - Alumínio	2,5	2,4	2,5	2,47	0,0577
	Porca 8 - Alumínio	2,5	2,5	2,4	2,47	0,0577
	Porca 9 - Alumínio	2,5	2,5	2,5	2,50	0,0000
	Porca 10 - Alumínio	2,5	2,5	2,4	2,47	0,0577
ESPESSURA PORCAS METÁLICAS	Porca 1 - CFRP	2,6	2,6	2,6	2,60	0,0000
	Porca 2 - CFRP	2,7	2,7	2,7	2,70	0,0000
	Porca 3 - CFRP	2,6	2,6	2,6	2,60	0,0000
	Porca 4 - CFRP	2,6	2,6	2,6	2,60	0,0000
	Porca 5 - CFRP	2,6	2,6	2,6	2,60	0,0000
	Porca 6 - Alumínio	2,7	2,7	2,6	2,67	0,0577
	Porca 7 - Alumínio	2,6	2,6	2,6	2,60	0,0000
	Porca 8 - Alumínio	2,6	2,7	2,6	2,63	0,0577
	Porca 9 - Alumínio	2,7	2,6	2,7	2,67	0,0577
	Porca 10 - Alumínio	2,6	2,6	2,6	2,60	0,0000

MEDIÇÕES PARA ENSAIOS DEFINITIVOS (mm)						
		MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
COMPRIMENTO GABARITOS	Gabarito 1	38,1	37,9	38	38,00	0,1000
	Gabarito 2	37,9	37,9	38	37,93	0,0577
	Gabarito 3	38	37,9	37,9	37,93	0,0577
	Gabarito 4	38,1	37,9	38	38,00	0,1000
	Gabarito 5	38,1	37,9	38,1	38,03	0,1155

Tabela 7 – Aferição de massas

MEDIÇÕES PARA ENSAIOS DEFINITIVOS - BALANÇA MARTE SEMI ANALÍTICA AD500 (g)						
		MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
ESFERA METÁLICA		0,25	0,26	0,25	0,2533	0,005773503
PORCAS METÁLICAS	Porca 1 - CFRP	0,521	0,521	0,522	0,5213	0,00057735
	Porca 2 - CFRP	0,541	0,541	0,54	0,5407	0,00057735
	Porca 3 - CFRP	0,535	0,534	0,536	0,5350	0,001
	Porca 4 - CFRP	0,531	0,531	0,531	0,5310	0
	Porca 5 - CFRP	0,51	0,52	0,53	0,5200	0,01
	Porca 6 - Alumínio	0,52	0,55	0,54	0,5367	0,015275252
	Porca 7 - Alumínio	0,54	0,53	0,54	0,5367	0,005773503
	Porca 8 - Alumínio	0,51	0,53	0,51	0,5167	0,011547005
	Porca 9 - Alumínio	0,50	0,50	0,52	0,5067	0,011547005
	Porca 10 - Alumínio	0,51	0,51	0,53	0,5167	0,011547005

A Tabela 6 se refere a todas as medições realizadas nos materiais que foram usados nos ensaios propostos ao longo deste trabalho. A placa de CFRP apresenta seu comprimento, largura e espessura. O diafragma utilizado tem suas espessuras apresentadas assim como a média e desvio padrão das medições realizadas. As distâncias e marcações feitas na superfície na placa de CFRP estão representadas acima, onde Ponto 0 – PZT se refere a distância entre a borda da placa e o centro do diafragma, PZT – Ponto 1 é a distância entre o centro do diafragma e o Ponto 1 demarcado na superfície da placa. O mesmo critério se aplica para as demais marcações sobre a superfície da placa. Vale ressaltar que todos os pontos descritos estão localizados ao centro do corpo de prova. Também foram mensurados os diâmetros internos, externos e espessuras de todas as porcas metálicas que foram utilizadas como dano induzido por adição nos ensaios já descritos.

A Tabela 7 apresenta as massas aferidas de todos os materiais que foram utilizados em ensaios neste trabalho. Todas as medidas foram obtidas através da utilização da balança semi-analítica, modelo AD500 da marca Marte.

APÊNDICE B – MÉTRICAS OBTIDAS A PARTIR DA PSD.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir dos cálculos das métricas de comparação a partir da PSD de modo a validar por meio comparativo os resultados apresentados anteriormente baseados no cálculo da FFT. Todas as métricas apresentadas nessa seção foram calculadas para uma banda de frequência selecionada de 8 a 16 kHz por ser a banda de frequência selecionada para o cálculo das mesmas métricas baseados no espectro de frequência obtidos com o FFT.

O RMSD obtido para a estrutura de CFRP está apresentado na Figura 47, onde é possível observar um comportamento semelhante ao obtido para a mesma métrica calculada a partir da FFT.

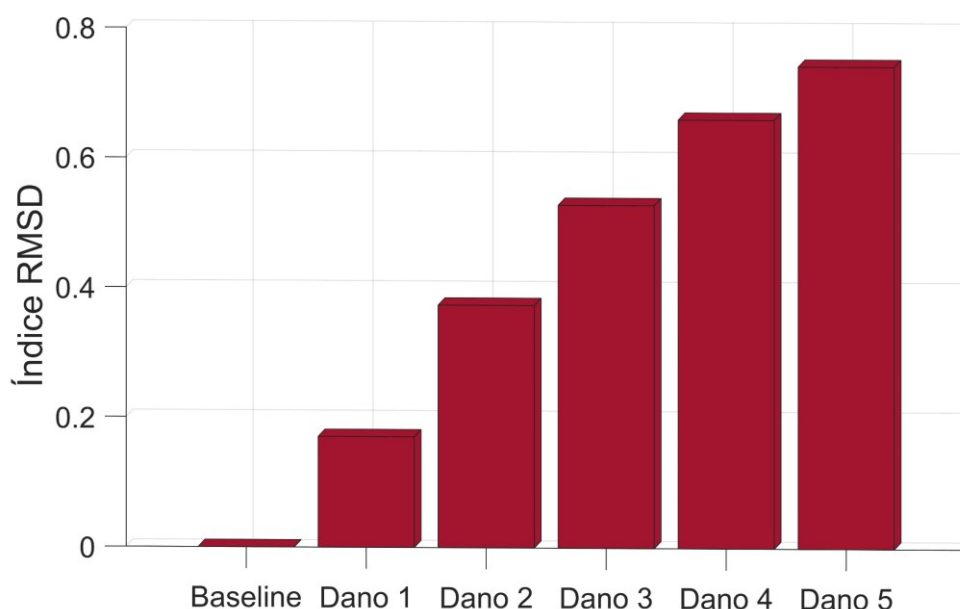


Figura 47 – RMSD a partir do PSD para a estrutura de CFRP

Assim como para o RMSD, o CCDM calculado para a estrutura de CFRP apresenta um aumento no valor no índice à medida que os danos são adicionados ao corpo de prova. O que indica que além de ocorrer uma variação na amplitude em decorrência dos danos, também ocorre uma defasagem no componente em frequência a medida em que os corpos metálicos são adicionados à superfície do corpo de prova. O CCDM calculado para a estrutura de CFRP pode ser observado mais detalhadamente na Figura 48.

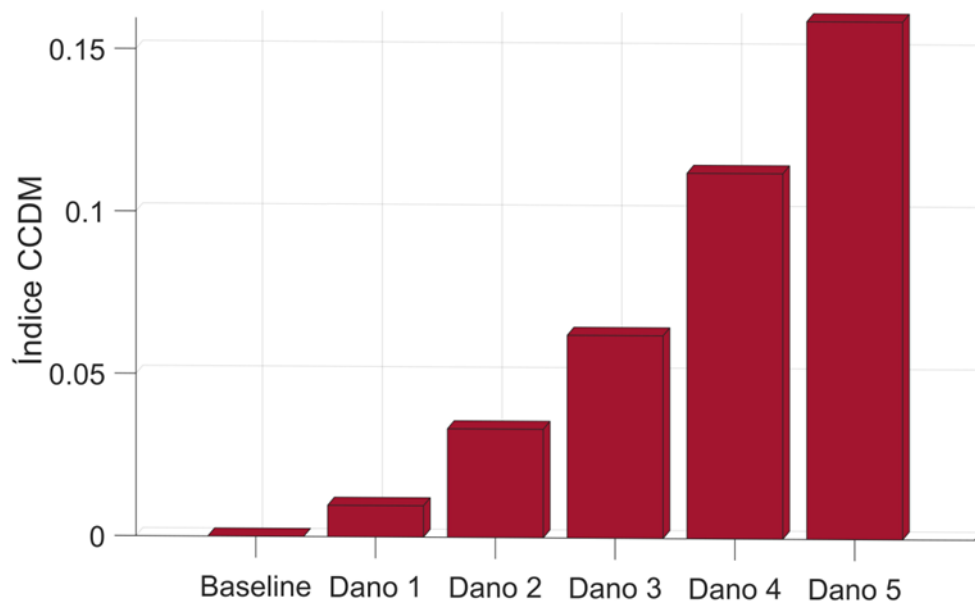


Figura 48 - CCDM a partir do PSD para a estrutura de CFRP

As mesmas métricas foram calculadas para a estrutura de alumínio, de modo a comparar com os resultados obtidos anteriormente através dos cálculos baseados na FFT. O cálculo do RMSD baseado na PSD pode ser observado na Figura 49.

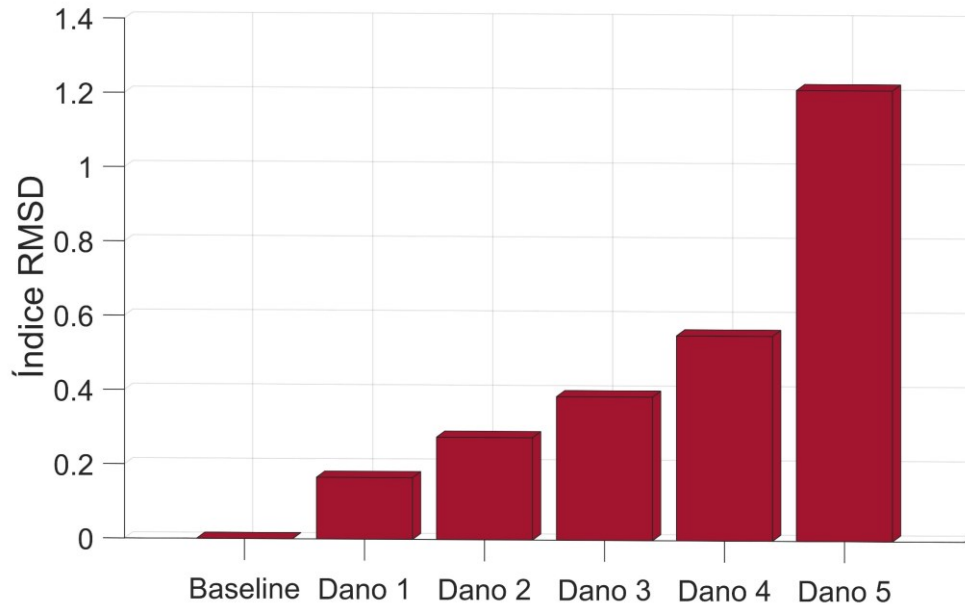


Figura 49 - RMSD a partir do PSD para a estrutura de Alumínio

Na Figura 50 está apresentado os valores do índice CCDM obtidos a partir do cálculo da PSD.

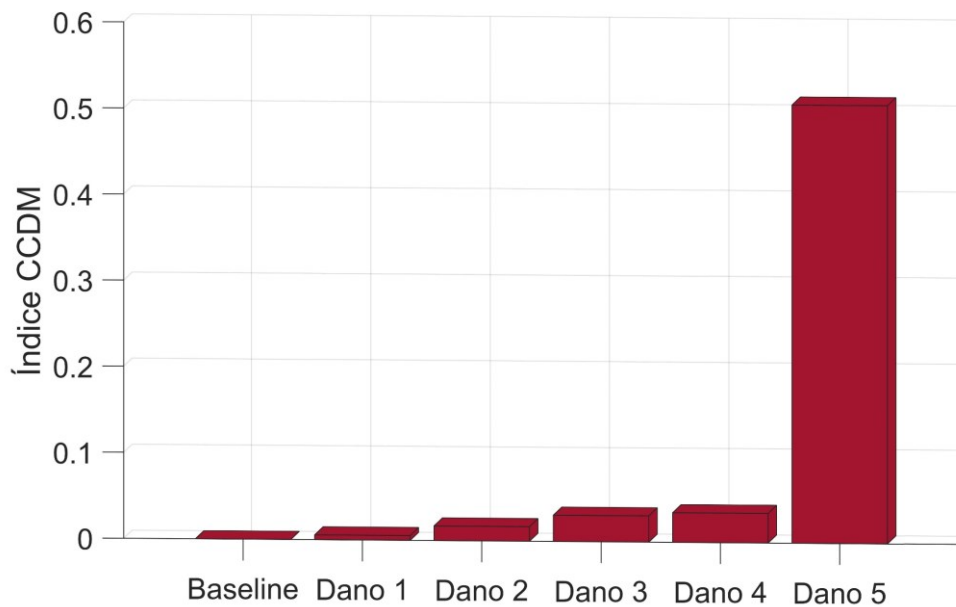


Figura 50 - CCDDM a partir do PSD para a estrutura de alumínio

O CCDDM obtido para a estrutura de alumínio apresenta uma variação dos valores dos índices que se diferencia dos demais obtidos e apresentados anteriormente. Este fato se dá devido à banda de frequência escolhida pelos autores, porém como a finalidade do cálculo destes índices baseados no PSD era exclusivamente comparativos, a banda de frequência de 8 a 16 kHz foi mantida. Vale ressaltar que apesar das diferenças citadas, o índice CCDDM tende a aumentar de acordo com o aumento da massa, assegurando assim a robustez do método utilizado.